

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
Базовая кафедра геоинформационных систем

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ В.И. Харук

« ____ » _____ 2017 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Применение данных дистанционного зондирования среднего разрешения для
выделения поврежденных древостоев

09.04.01 Информатика и вычислительная техника

09.04.01.07 Дистанционное зондирование и ГИС-технологии в мониторинге
природных и антропогенных экосистем

Научный руководитель _____ доцент кафедры Б-ГИС Е.В. Федотова
подпись, дата

Выпускник _____ Н.С. Спиридонова
подпись, дата

Рецензент _____ к.б.н.. н.с. ИЛ СО РАН А.С. Шушпанов
подпись, дата

Нормоконтролер _____ Е.В. Федотова
подпись, дата

Красноярск 2017

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
Базовая кафедра геоинформационных систем

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ В.И. Харук
подпись

« _____ » _____ 2017 г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации**

Студенту Спиридоновой Нине Сергеевне

Группа: КИ15-01-7М Направление (специальность): 09.04.01

Информатика и вычислительная техника

Тема выпускной квалификационной работы: «Применение данных дистанционного зондирования среднего разрешения для выделения поврежденных древостоев»

Утверждена приказом по университету № 7122/с от 01.06.2017 г.

Руководитель ВКР: Федотова Е.В., доцент кафедры Б-ГИС

Исходные данные для ВКР:

- космоснимки Landsat 8 OLI
- данные SRTM с разрешением 1 секунда дуги
- растровая карта растительности TerraNorte RLC на территорию РФ
- растровая карта динамики лесного покрова.

Перечень разделов ВКР:

Введение

Обзор работ по изучению реакции растительного покрова на изменения климата с помощью данных дистанционного зондирования

Область исследования и предварительная обработка данных

Картирование усохших лесов по снимкам Landsat

Анализ точности результатов, полученных разными методами

Определение степени усыхания территории, и оценка ландшафтной приуроченности усохших лесов

Заключение

Список используемых источников

Перечень графического материала: слайды презентации.

Руководитель ВКР _____

Е.В. Федотова

Задание принял к исполнению _____
подпись

Н.О. Спиридонова

« ____ » _____ 2017 г.

АННОТАЦИЯ

Лес является важнейшим природным ресурсом для человечества. Его значение трудно переоценить. Очень важно следить за состоянием леса, оказывать своевременное проведение лесозащитных мероприятий. Для этого необходима своевременная информация о состоянии лесов, причинах и объемах повреждений лесов.

Вследствие вышесказанного применение данных дистанционного зондирования среднего и высокого разрешения для выделения поврежденных древостоев является актуальной задачей. В данной работе апробировались различные способы выделения усыхающих древостоев с целью выявления наилучшего метода определения усыханий.

В качестве исследуемой области была выбрана территория Кузнецкого Алатау и смежных хребтов – Абаканского и Салаирского кряжа, так как известно, что на этой территории наблюдаются усыхание пихты сибирской с середины 1990-х [25].

Были выявлены места усыханий данной территории с помощью различных признаков, а именно NDVI, SWVI, визуальное определение по снимкам высокого пространственного разрешения в программе SASPlanet. Было проведено сравнение усыханий полученных с помощью различных признаков с картой динамики лесного покрова. Составлена векторная карта территории Кузнецкого Алатау и смежных хребтов – Абаканского и Салаирского кряжа с отмеченными усыханиями. Определено что 1,8% занимают усохшие древостои. В результате проведения анализа ландшафтной приуроченности выявлено, что высота над уровнем моря у усохших темнохвойных лесов больше, чем у здоровых

Ключевые слова: усыхание темнохвойных лесов, Landsat, древостои, классификация, дистанционное зондирование, Кузнецкое Алатау.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Обзор работ по изучению реакции растительного покрова на изменения климата с помощью данных дистанционного зондирования	6
1.1 Задачи, решаемые исследователями	6
1.2 Используемые данные дистанционного зондирования	8
1.3 Алгоритмы обработки данных для выделения поврежденной растительности	11
1.4 Классификация	13
2 Область исследования и предварительная обработка данных	19
2.1 Область исследования	19
2.2 Подготовка данных дистанционного зондирования к анализу	22
2.2.1 Программное обеспечение, используемое в работе	22
2.2.2 Данные, используемые в работе	25
2.2.3 Атмосферная коррекция	26
2.3 Цифровая модель рельефа	28
2.4 Карты растительного покрова, используемые в работе	29
2.4.1 TerraNorte	29
2.4.2 Карта динамики лесного покрова	29
2.5 Данные высокого пространственного разрешения, получаемые с помощью программы SASPlanet	30
2.6 Построение мозаики снимков с темнохвойными лесами	31
3 Картирование усохших лесов по снимкам Landsat	34
3.1 Признаки, использовавшиеся для выделения усохших древостоев	34
3.1.1 Вегетационный индекс нормированной разности NDVI	34
3.1.2 Коротковолновой индекс SWVI	37
3.1.3 Метод главных компонент	37
3.1.4 Индекс гарей NBR	39
3.2 Выделение усохших древостоев с помощью NDVI	40
3.3 Выделение усохших древостоев с помощью индекса SWVI	41

3.5	Выделение усохших древостоев с помощью метода главных компонент	44
3.6	Выделение территорий с горящими.	44
3.6	Выделение усохших древостоев с помощью программы SasPlanet	46
3.7	Сравнение территорий с усохшими древостоями с картой динамики лесного покрова 2000-2014 годов	47
4	Анализ точности результатов, полученных разными методами	49
5	Определение усыхания территории и оценка ландшафтной приуроченности усохших лесов	53
5.1	Определение степени усыхания темнохвойных лесов.	53
5.2	Анализ характеристик рельефа на территориях с усохшими лесами	56
5.3	Создание векторной карты с усыханиями и здоровыми лесами	63
	Заключение	64
	Список использованных источников	65
	Приложение А. Карта усыхания на территории Кузнецкого Алатау и Абаканского и Салаирского кряжа масштаба 1:2 000 000	69

ВВЕДЕНИЕ

Среди глобальных экологических проблем на первое место мировое сообщество ставит изменение климата. Изменение климата в истории человечества - одна из самых важных характеристик среды. За 200 млн. лет климат Земли непрерывно менялся, но никогда это не происходило столь быстро, как сейчас. Резкое изменение климата в бореальных областях сказывается уменьшением количества морозных зим. За последние 25 лет средняя температура приземного слоя воздуха возросла на $0,7^{\circ}\text{C}$. В экваториальной зоне она не изменилась, но чем ближе к полюсам, тем потепление заметнее [28]. Глобальное потепление уже существенно воздействует на наземные экологические системы: это проявляется в более раннем наступлении весны и продвижении на север ареалов растений и животных [10]. В северных широтах вегетативный сезон увеличился на 2 недели [10]. Повышение планетарной температуры более чем на $1,5\text{--}2,5^{\circ}\text{C}$ связано с угрозой массовой трансформации лесных площадей в нелесные [10]. Бореальные леса наиболее подвержены угрозам со стороны изменения климата, с одной стороны, из-за восприимчивости к потеплению, с другой — из-за гораздо большего потепления в арктической зоне по сравнению с увеличением средней планетарной температуры [10]. Уменьшение площади лесов приводит к уменьшению биоразнообразия экосистем, нарушению их функций и обеднению генофонда планеты.

Среди древесных пород, наиболее подверженными усыханию, оказались представители рода пихт. Пихтовые леса интенсивно повреждаются в России, на территории ряда других европейских стран, а также в США, Канаде, в Восточных Гималаях. Ни одна из рабочих гипотез, объясняющих усыхание пихтовых лесов, не получила всеобщего признания. Предполагается, что усыхание вызвано воздействием комплекса факторов. При этом безусловное значение имеют естественные факторы — вековые смены растительности, засухи, сильные морозы, избыток осадков. Не исключено, что ключевую роль

играет загрязнение атмосферы, особенно усилившееся в последние три десятилетия [9].

Целью данной работы является разработка метода выделения усохших древостоев по снимкам среднего пространственного разрешения.

Задачи работы:

- провести предварительную подготовку снимков Landsat (выполнить атмосферную коррекцию, ограничить данные территорией темнохвойных и смешанных лесов);
- применить несколько признаков для выделения усохших лесов: NDVI, SWVI, метод главных компонент, индекс NBR;
- выделить усохшие древостои с помощью данных программы SASPlanet с высоким пространственным разрешением;
- сравнить полученные с помощью различных признаков и программы SASPlanet результаты с картой динамики лесного покрова 2000-2014 годов;
- определить площадь усыхания лесов;
- проанализировать точность определения усохших древостоев;
- провести анализ связи положения усохших древостоев с характеристиками рельефа.

1 Обзор работ по изучению реакции растительного покрова на изменения климата с помощью данных дистанционного зондирования

1.1 Задачи, решаемые исследователями

Для выявления повреждения лесов в России проведены масштабные исследования по использованию данных дистанционного зондирования (ДЗЗ). Первое изучение по чёрно-белым аэрофотоснимкам масштаба 1:8000 – 1:10000 сухостойных насаждений и определение их степени усыхания в 1926 г. проводил Г.Г. Самойлович. Особенности лесопатологического дешифрирования аэрокосмических снимков изучали также С.В. Белов, А.А. Кирильцева, А.С. Исаев, Ю.А. Прокудин, В.Я. Ряполов, В.В. Киселев, Ю.П. Кондаков, П.А. Кропов, В.М. Жирин, С.Е. Ямбург, Л.А. Берснева и другие исследователи [27].

В производственных масштабах применялось аэровизуальное обследование; аэрофотосъемка с целью определения состояния ограничивалась в основном опытными работами. При дешифрировании аэрофотосъемки достигалась высокая точность определения отпада, степени дефолиации, соответствующие нормы вошли в отраслевые руководства и инструкции. Однако применение аэрофотосъемки ограничивает высокая стоимость и низкая оперативность работ, сложное получение разрешительных документов. К моменту получения аэрофотосъемки информация на снимках часто уже не соответствует актуальному состоянию лесов. Космическая съемка в большинстве случаев дает более низкую точность определения состояния, однако она более оперативна, дешевле (данные некоторых сенсоров бесплатны). На сегодняшний момент мы имеем на большую часть территории России ежегодное многократное покрытие данными различного разрешения. В то же время большую проблему представляет получение безоблачных данных. Из-за недостатка данных часто приходится использовать для разных частей

объекта данные различных сенсоров, имеющие разные особенности отображения дешифрируемых объектов.

Для выявления поврежденных лесов используют визуальное дешифрирование и автоматическое дешифрирование. Визуальное дешифрирование обеспечивает более быстрые результаты и требует меньше наземных эталонов, чем любой из алгоритмов автоматического выявления изменений. Однако достаточно сложна проблема пропуска участков, особенно мелких, нестабильность результатов дешифрирования разными людьми.

Автоматическое дешифрирование требует больших затрат на подбор необходимого алгоритма и его параметров, достаточно большой обучающей выборки и трудоемкой верификации результатов, однако в перспективе обладает более высокой производительностью и стабильностью результатов. Целесообразность применения визуального или автоматического дешифрирования зависит от ситуации.

При автоматизированном выявлении поврежденных участков применяются различные методы компьютерной классификации изображений. Для одиночных снимков в основном используются алгоритмы классификации с применением эталонов, например, по методу максимального правдоподобия [31]. Выявление изменений с помощью анализа серий снимков обычно показывает более высокую точность. Различными исследователями использовались критерии на основе разницы вегетационных индексов NDVI, SWVI и результатов преобразования Tasselled Cap [7]. При лесопатологическом дешифрировании необходимо выявить повреждение, оценить его площадь, степень.

Для дешифрирования могут использоваться спектральные текстурные признаки, форма повреждений. Для выявления изменений используются в основном спектральные признаки, алгоритмы классификации по которым наиболее развиты. В ходе данной работы по дистанционному мониторингу апробировались эти способы в различных вариациях (пороги изменения NDVI,

SWVI). Так как использовались данные спутника Landsat 8, вместо преобразования Tasselled Cap был применен метод главных компонент.

Также были использованы снимки высокого пространственного разрешения, которые были получены в программе SASPlanet. Полученные результаты усыхания были сопоставлены с данными карты динамики лесного покрова 2000-2014 годов. [24][32].

1.2 Используемые данные дистанционного зондирования

На сегодняшний момент мы имеем на большую часть территории России ежегодное многократное покрытие данными различного разрешения. В то же время большую проблему представляет получение безоблачных данных. В настоящее время не существует «идеального» спутника, изображения с которого имели бы пространственное, временное и спектральное разрешение и производительность, позволяющие решать все задачи мониторинга состояния насаждений. На практике необходимо применять атмосферную коррекцию, а также использовать набор разных данных:

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (спектрорадиометр среднего разрешения, MODIS) — для оперативного выявления крупных повреждений в однородных лесных массивах труднодоступных районов в автоматическом режиме.

Land Remote-Sensing Satellite (спутник дистанционного зондирования земли, Landsat), Satellite Pour l'Observation de la Terre-4 (SPOT-4) — для производительного и высокой степени автоматизированного выявления и оценки площади относительно крупных повреждений один или несколько раз в год на больших площадях (вплоть до всей территории РФ).

RapidEye — для выявления нарушений в смешанных, неоднородных насаждениях, повреждений, представляющих собой мозаику мелких поврежденных и здоровых участков, выявления дефолиации пород, быстро восстанавливающих листву.

GeoEye, WorldView-2 и т.п. — для мониторинга ограниченной площади особо ценных лесов (например, Московской области).

Наиболее успешный пример применения спутниковых данных в лесном мониторинге — системы мониторинга лесных пожаров. В России функционирует несколько таких систем, наиболее развита Информационная система дистанционного мониторинга (ИСДМ), разработанная Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН) по заказу Рослесхоза. Она построена на использовании снимков Advance Very High Resolution Radiometer (Усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения, AVHRR) и Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (спектрорадиометр среднего разрешения, MODIS). В развитие принципов системы был создан Блок лесопатологического мониторинга (БЛПМ). Его алгоритм обработки снимков MODIS хорошо показал себя на детектировании крупных очагов сибирского шелкопряда. Однако практика использования модуля показала, что разрешения MODIS недостаточно, чтобы надежно детектировать и идентифицировать большинство патологических нарушений в лесах. Для детектирования нарушений, которые проявляются как мозаика мелких пораженных участков, а также нарушений в сильно фрагментированных лесах необходимы снимки более высокого разрешения. С 2008 г. Федеральное бюджетное учреждение "Российский центр защиты леса" (ФГУ «Рослесозащита») ведет мониторинг территорий с наиболее напряженной лесопатологической ситуацией по снимкам Land Remote-Sensing Satellite Thematic Mapper/ Enhanced Thematic Mapper (спутник дистанционного зондирования земли, Landsat TM/ETM)+ с частичным привлечением снимков RapidEye, ALOS/AVNIR-2 [7].

Перед использованием различных данных с целью выявить усохшие древостои необходимо подготовить данные. Одним из этапов предварительной обработки космических снимков является атмосферная коррекция. В данной работе была проведена атмосферная коррекция с помощью модуля FLAASH. Модуль FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) разработан компанией Spectral Sciences — мировым лидером при финансовой

поддержке американской лаборатории исследования атмосферного воздействия. Модуль выполняет атмосферную коррекцию с использованием моделей MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission), который учитывает солнечный зенитный угол, угол наблюдения, среднее значение высоты поверхности, и определенные модели атмосферы, типов аэрозолей и дальности видимости. FLAASH производит атмосферную коррекцию и конвертирует значения яркости снимков из Radiance в Reflectance.

Для применения модуля FLAASH необходимо знать некоторые параметры снимка. А именно тип сенсора, дата снимка, координаты центра снимка, значение видимости, модель атмосферы, модель аэрозолей.

Существуют 4 вида модели аэрозолей.

Rural – если район расположен на удалении от урбанизированных территорий.

Urban – если территория расположена в районах подверженных значительному загрязнению атмосферы в условиях, город или индустриально развитая территория.

Maritime – если территория расположена вблизи моря, либо преобладает ветер с океана.

Tropospheric – если видимость высокая (более 40 км), это частный случай модели Rural.

Исходя из данных снимка, необходимо определить к какой модели аэрозолей подходит снимок. Также нужно указать модель атмосферы, определив ее по приведенной ниже таблице (рисунок 1). Модель зависит от широты и времени года [11].

Latitude (°N)	Jan.	March	May	July	Sept.	Nov.
80	SAW	SAW	SAW	MLW	MLW	SAW
70	SAW	SAW	MLW	MLW	MLW	SAW
60	MLW	MLW	MLW	SAS	SAS	MLW
50	MLW	MLW	SAS	SAS	SAS	SAS
40	SAS	SAS	SAS	MLS	MLS	SAS
30	MLS	MLS	MLS	T	T	MLS
20	T	T	T	T	T	T
10	T	T	T	T	T	T
0	T	T	T	T	T	T
-10	T	T	T	T	T	T
-20	T	T	T	MLS	MLS	T
-30	MLS	MLS	MLS	MLS	MLS	MLS
-40	SAS	SAS	SAS	SAS	SAS	SAS
-50	SAS	SAS	SAS	MLW	MLW	SAS
-60	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW
-70	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW
-80	MLW	MLW	MLW	SAW	MLW	MLW

Рисунок 1 – Модели атмосферы

После проведения атмосферной коррекции можно применять различные алгоритмы выделения усохших лесов.

1.3 Алгоритмы обработки данных для выделения поврежденной растительности

В зависимости от наличия доступного набора спутниковых данных возможно использование двух принципиально различных подходов к оценке степени дефолиации. Один из них основан на сопоставлении разновременных изображений, первое из которых получено перед воздействием, а второе после него. В этом случае для анализа применимы различные варианты широко развитой техники выявления изменений по разновременным спутниковым изображениям. Однако имеются практические трудности использования данного подхода в связи с требованием наличия изображений в момент времени, предшествующий повреждению. Другой подход предполагает использование изображений, полученных в некий фиксированный момент

времени (т.е. одномоментных изображений) в процессе (или после) деструктивного воздействия с последующей их автоматической классификацией или визуальной интерпретацией [1].

Визуальное дешифрирование обеспечивает более быстрые результаты и требует меньше наземных эталонов, чем любой из алгоритмов автоматического выявления изменений. Однако достаточно сложна проблема пропуска участков, особенно мелких, нестабильность результатов дешифрирования разными людьми. Автоматическое дешифрирование требует больших затрат на подбор необходимого алгоритма и его параметров, достаточно большой обучающей выборки и трудоемкой верификации результатов, однако в перспективе обладает более высокой производительностью и стабильностью результатов. Целесообразность применения визуального или автоматического дешифрирования зависит от ситуации.

При автоматизированном выявлении поврежденных участков применяются различные методы компьютерной классификации изображений. Для одиночных снимков в основном используются алгоритмы классификации с применением эталонов, например, по методу максимального правдоподобия [31].

Используемые методы классификации изображений позволяют распознавать весьма ограниченное (как правило, не более трех) число классов дефолиации [1]. Данные ограничения возникают в результате низкого пространственного разрешения или недостаточно регулярного поступления спутниковой информации. Другое существенное ограничение связано с необходимостью подготовки репрезентативного набора опорных данных для классификации, сопряженного, как правило, с проведением дорогостоящих авиационных и наземных обследований.

Обычно показывает более высокую точность выявление изменений с помощью анализа серий снимков. Различными исследователями использовались критерии на основе разницы вегетационных индексов Normalized Difference Vegetation Index (Нормализованный относительный

индекс растительности, NDVI), Swingplane Ventures, Inc (Разностный индекс, SWVI) и результатов преобразования Tasselled Cap [7]. Также возможно применение метода главных компонент, нейронных сетей.

В данной работ для определения усыхания леса были применены совокупность различных методов, а именно: NDVI, SWVI, метод главных компонент, визуальное определение по снимкам с высоким пространственным разрешением.

1.4 Классификация

Для того, чтобы рассчитать площадь усохших и здоровых лесов, необходимо провести классификацию.

Выделяют два метода классификации — неконтролируемую и контролируемую [29]. При неконтролируемой сначала, на основании только той информации, которая представлена в данных, выделяются спектральные классы, и лишь затем оператор пытается сопоставить их с реальными пространственными объектами. Группирование данных на первом этапе осуществляется с помощью программ кластерного анализа, при этом оператор обычно указывает, на какое количество групп (кластеров) можно, по его мнению, разделить весь набор исходных данных. Помимо этого, оператор может указать критерии разделения различных кластеров и возможный разброс значений внутри каждого из них. Процедура разделения на кластеры является итерационной. На каждом этапе оператор может объединять или разделять определенные кластеры. Таким образом, несмотря на свое название, неконтролируемая классификация не является полностью автоматической. Вместе с тем, классы объектов в данном методе не определяются заранее, а выявляются в результате некоторой численной процедуры [29].

Для контролируемой классификации используют эталонные области, которые выбираются оператором в программе ERDAS Imagine в соответствии с их принадлежностью к определенному информационному классу. При выборе

этих областей оператор опирается на свое знание территории и расположенных на ней объектов. Таким образом, именно он контролирует разделение всех объектов на определенные классы. Значения пикселей эталонных областей в различных спектральных диапазонах используются в качестве обучающих выборок для настройки программы распознавания. В результате, для каждой области определяется эталон — совокупность спектральных признаков, задающих один класс пикселей на цифровом снимке. После этого каждый пиксель снимка относится к тому либо иному классу на основании последовательного сравнения со всеми созданными эталонами. Таким образом, при контролируемой классификации сначала определяются информационные классы, а затем соответствующие им спектральные [29].

Выбор метода классификации

Для распределения пикселей снимка по классам можно использовать разные методы, причем выбор того или иного классифицирующего правила зависит от типа исходных данных и решаемой задачи. Далее рассмотрим, какие методы контролируемой классификации больше подходят к определенным задачам.

Метод спектрального угла.

Метод спектрального угла дает хорошие результаты, когда нужно провести классификацию для объектов, которые имеют схожие значения яркости.

Метод минимального расстояния.

Метод минимального расстояния применяют, когда области значения яркости объектов пересекаются.

Метод параллелепипедов.

Метод параллелепипедов применяют, когда области значения яркости объектов не пересекаются.

Метод максимального правдоподобия.

Этот метод применяют в особенно сложных случаях, когда области значений яркости разных классов в пространстве признаков перекрываются и имеют сложную (или вытянутую) форму.

Метод расстояния Махаланобиса.

Этот метод является более точным, по сравнению со способом минимального расстояния, поскольку учитывает распределение значений яркости обучающих выборок.

Бинарное кодирование.

Этот метод применяют, если все пиксели на снимке нужно разделить на два класса [4].

Далее рассмотрим сами методы контролируемой классификации.

Метод классификации на основе определения наименьшего расстояния.

В данном методе классифицируемые объекты относят к тому или иному классу, вычисляя евклидово расстояние в пространстве признаков между проверяемыми и эталонными пикселями и относя каждый пиксел к тому классу, до эталона которого это расстояние минимально.

Метод параллелепипеда.

В признаковом пространстве выделяют замкнутые прямоугольные области, границы которых задают на основе выбора характерных диапазонов по гистограммам распределения яркостей эталонных объектов в двух, трех или более зонах спектра; каждый пиксел снимка относят к тому классу, в чей параллелепипед он попадает по своим значениям яркости.

Метод максимального правдоподобия.

Метод основанный на статистических оценках характеристик классов объектов. При его реализации для каждого дешифрируемого класса объектов нужно определить две функции условной вероятности, связанные формулой Байеса: $P(X/A_i)$ — правдоподобие класса объектов A_i при данном векторе признаков X и $P(A_i/X)$ — вероятность отнесения пикселей с их вектором признаков X к классу A . Первая функция отражает различия в яркостях объектов разных классов, и ее параметры находят путем вычисления

статистических характеристик распределения яркостей пикселей в пределах эталонных объектов на снимке — построения обучающих выборок. Процедура классификации относит каждый пиксел с измеренным X к тому объекту, для которого правдоподобие максимально, т.е., согласно байесову решающему правилу, нахождение объекта в заданной области признакового пространства статистически наиболее правдоподобно (отсюда и название «метод максимального правдоподобия») [5].

Алгоритм расчета расстояния Махаланобиса.

Расстояние Махаланобиса — это расстояние между заданной точкой и центром тяжести, деленное на ширину эллипсоида в направлении заданной точки. Если матрица ковариации является единичной, то расстояние Махаланобиса становится равным расстоянию Евклида. Если матрица ковариации диагональная (но необязательно единичная), то получившаяся мера расстояния равна нормализованному евклидовому расстоянию [8].

Алгоритм спектрального угла.

При классификации алгоритмом спектрального угла все пиксели снимка, в том числе и эталонные, рассматриваются как векторы в пространстве спектральных признаков. Задается максимально допустимый спектральный угол, то есть, если угол между эталонным вектором и вектором пикселя, который подвергается классификации меньше максимального, то этот пиксел относится к данному классу, если больше - не относится.

Бинарное кодирование.

При бинарном кодировании всем пикселям присваивается одно из двух значений на основе сравнения со значениями эталонных выборок. Во время классификации значения каждого пикселя сравниваются со средним эталонной выборки. В результате получается бинарное изображение [4].

После проведения контролируемой классификации необходимо посчитать ее точность с помощью матрицы ошибок. Матрица ошибок представляет собой инструмент, использующий кросс-табуляцию для показа того, как соотносятся значения совпадающих классов, полученные из

различных источников. В качестве источников могут выступать, например, проверяемый растр (тематическая классификация) и опорный более точный источник данных (растр или набор полевых данных в виде точек). При интерпретации результатов обычно полагается, что проверяемый результат потенциально является неточным, а проверочный растр хорошо отражает реальную ситуацию. В противном случае, если проверочный растр также несовершенен, нельзя говорить об «ошибке», а следует говорить о «разнице» между двумя наборами данных. Для построения матрицы могут использоваться все ячейки растра (пиксели) или выборка ячеек, расположенных случайно, стратифицировано случайно или согласно какому-либо другому распределению. По одной из осей матрицы записываются названия классов легенды классификации проверяемого набора данных, по второй — классы легенды данных, используемых для проверки (рисунок 2).

		Реальные классы					Σ
		A	B	C	D	E	
Расчетные классы	A	n_{AA}	n_{AB}	n_{AC}	n_{AD}	n_{AE}	n_{A-}
	B	n_{BA}	n_{BB}	n_{BC}	n_{BD}	n_{BE}	n_{B-}
	C	n_{CA}	n_{CB}	n_{CC}	n_{CD}	n_{CE}	n_{C-}
	D	n_{DA}	n_{DB}	n_{DC}	n_{DD}	n_{DE}	n_{D-}
	E	n_{EA}	n_{EB}	n_{EC}	n_{ED}	n_{EE}	n_{E-}
Σ		n_{-A}	n_{-B}	n_{-C}	n_{-D}	n_{-E}	N

Рисунок 2 – Матрица ошибок

Серым отмечена главная диагональ матрицы, показывающая случаи, где расчетные классы и реальные данные совпадают (правильная классификация). Сумма значений диагональных элементов показывает общее количество правильно классифицированных пикселей, а отношение этого количества к общему количеству пикселей в матрице N называется общей точностью классификации и обычно выражается в процентах [18]:

$$overall\ accuracy = \frac{n_{AA}+n_{BB}+n_{CC}+n_{DD}+n_{EE}}{N} \quad (1)$$

Подводя итог первой главы, можно сделать вывод, что современный рынок данных ДЗЗ предоставляет широкие возможности по выбору космоснимков, которые могут быть использованы для создания и обновления геопространственной информации. Для задач крупномасштабного топографического картографирования подойдут снимки сверхвысокого пространственного разрешения (выше 2 м), такие как WorldView-1-3, GeoEye-1, QuickBird и др, высокого пространственного разрешения (2-3 м), такие как Radarsat-2, SPOT-5 и др. Для целей тематического картографирования, в большинстве случаев, подходят космоснимки среднего пространственного разрешения, имеющие большое количество спектральных каналов, отвечающих за узкие участки спектра. Наличие каналов в среднем, ближнем и дальнем инфракрасных диапазонах дает расширенные возможности для прикладных задач, связанных с картографированием растительного и почвенного покровов. К таким съемочным системам относят прежде всего, RapidEye, ALOS AVNIR-2, Landsat-5/7/8, ASTER и др. Современные космоснимки более низкого пространственного разрешения в таких системах, как MODIS, MERIS, NOAA и других, также несут огромный объем полезной информации, позволяющей решать задачи тематического картографирования в мелких масштабах [17]. Тем не менее в настоящее время не существует «идеального» спутника, изображения с которого имели бы пространственное, временное и спектральное разрешение и производительность, позволяющие решать все задачи мониторинга состояния насаждений, поэтому для каждой задачи выбирается наиболее подходящий спутник. Для задачи выявления усыханий древостоев используются различные способы. Наиболее часто используются критерии на основе разницы NDVI, SWVI, метода опорных векторов. Тем не менее несмотря на наличие различных способов выявления усыханий, определить точно территорию с усохшими лесами достаточно сложно. Так как территории на которых был пожар или вырубки леса по индексам NDVI, SWVI и

визуальному дешифрованию космоснимков среднего пространственного разрешения похожи на усыхания.

2 Область исследования и предварительная обработка данных

2.1 Область исследования

Кузнецкий Алатау – горная система, ограниченная с запада Кузнецкой котловиной, с востока – Минусинским межгорным понижением. Орографически Кузнецкий Алатау можно подразделить на 3 части: центральную – хребет Саргая и его отрогами с гольцом Большой Каным (1874 м) в центре; южную – с хребтом Тигер-Тыш; северную – в основном низко- и среднегорную. В высокогорном поясе большим распространением пользуются ледниковые формы рельефа. Современное оледенение даже на самых высоких вершинах гор выражено слабо, однако в некоторых местах, например, на массиве Тигер-Тыш и на Тумуяском гольце, формы ледникового рельефа настолько свежи, что говорят о недавнем воздействии ледниковой эрозии. Для ландшафта этих районов характерны ступенчатые кары, троговые долины, моренные гряды, а в понижениях сосредоточено большое количество ледниковых озер разной величины. В верхних частях склонов на абсолютной высоте более 1300 м рассеяны многолетние фирновые снежники и небольшие остаточные ледники. В настоящее время на Кузнецком Алатау насчитывается около 90 ледников общей площадью 6,8 км². Высокогорный рельеф и современное оледенение в Кузнецком Алатау располагаются на наиболее низких абсолютных высотах в пределах всей Алтае-Саянской горной области, что обусловлено как более северным положением этой территории, так и очень большим количеством осадков на верхнем уровне гор. На вершинах гор Кузнецкого Алатау широко представлены таскылы — лишенные растительности вершинные поверхности горных гряд и массивов, покрытых каменистыми россыпями и курумами. В настоящее время эти скопления

крупных каменных глыб медленно, но неуклонно спускаются вниз по склону в речные долины; скорость движения курумов в Кузнецком Алатау составляет 13–15 см в год. Реки, берущие начало на Кузнецком Алатау, относятся к бассейну одной из двух рек – Томь и Чулым. Главный водораздел Кузнецкого Алатау проходит в основном между бассейнами этих двух крупных притоков Оби. Истоки Томи расположены в южной части Кузнецкого Алатау, на его границе с Абаканским хребтом. С западного макросклона в нее впадают многоводные правые притоки: Бельсу (длина 83 км), Уса (179 км), реки Верхняя, Средняя и Нижняя Терсь (соответственно 95, 114, 110 км), р. Тайдон (110 км) и др. На восточном макросклоне берут начало реки, относящиеся к бассейну Чулыма, – Белый Июс (вместе с р. Пихтерек – 224 км) и Черный Июс (178 км). Северная часть Кузнецкого Алатау дренируется реками Кия (общая длина 548 км), Урюп и Яя, также относящимися к бассейну Чулыма (низовья этих трех рек находятся за пределами Кузнецкого Алатау). В Кузнецком Алатау широко распространены озера. Самые крупные из них (Большой и Малый Берикуль) расположены в северо-восточной средне- и низкогорной части. Вблизи основного водораздела Кузнецкого Алатау расположено более 250 горно-ледниковых озер, лежащих на высоте более 1000 м и имеющих глубину 50–64 м. В отличие от других гор Алтае-Саянской горной области здесь выпадает больше осадков. Западный склон Кузнецкого Алатау лежит поперек пути западных влагонесущих воздушных течений. Количество осадков здесь составляет свыше 1000 мм в год, а местами — почти 2000 мм. Зима на западных склонах исключительно многоснежная и на высоте свыше 1200 м глубина снежного покрова достигает 3,5-4 м. Для почвенного покрова лесного пояса Кузнецкого Алатау характерна его однородность, большая мощность почвенных горизонтов и профилей почв, мелкоземистый глинистый механический состав, устойчивость морфологических признаков почв. Нижний пояс почв образуют светло-серые глубокоподзолистые почвы алтайской черни, развитые на покровных бескарбонатных глинах и распространенные с высоты 200-300 м над ур. м. В верхних поясах гор развиты горные слабоподзолистые

почвы, характеризующиеся кислой реакцией в верхней части профиля, светлой окраской, наличием подстилки и незначительным накоплением гумуса. В высокогорном поясе встречаются небольшие участки горно-тундровых и несколько чаще горно-луговых почв. Крутые склоны почти совершенно лишены почвенного покрова.

Салаирский кряж занимает северо-западную окраину Алтайско-Саянской горной страны и ограничивает Кузнецкую котловину с запада. Морфологически он представляет собой поднятие, почти утратившее черты горной системы. Здесь нет высоких горных хребтов, и относительное превышение водораздельной линии над прилегающими равнинными пространствами составляет всего 200-300 м. Однако Салаирский кряж имеет значение климатического барьера, в его пределах берут начало многие реки, а по своему происхождению он тесно связан с Алтае-Саянской горной системой. Средние высоты Салаира колеблются в пределах 420-470 м над ур. м., но отдельные сопки достигают несколько большей высоты (до 600 м).

Салаир может быть подразделен на четыре морфологические единицы: 1) пологий и длинный западный склон, 2) плато, 3) более короткий и расчлененный восточный склон и 4) крайняя юго-восточная часть, которая рядом уступов обрывается к Кузнецкой котловине. В Салаирском кряже количество осадков на 20-30% больше, чем на соседних равнинах. Несмотря на сравнительно небольшую высоту, он является климатическим барьером, стоящим на пути влажных западных ветров. Западные склоны получают около 500 мм осадков в год на севере, до 800 мм на юге, тогда как у подножия восточных склонов их количество снижается до 400 мм. Средняя температура июля колеблется от 15 до 18°, января — от -16 до -20°С. Продолжительность вегетационного периода составляет около 145 дней. Снежный покров зимой имеет высоту более 1 м.

Реки Салаира принадлежат к бассейну Оби. По его восточному склону стекают притоки Ини, а реки западного склона относятся к системам Берди и Чумыша. Почвенный покров на большей части Салаира довольно

однообразный в связи с преобладанием глубокоподзолистых почв тайги, но вдоль восточной окраины, в полосе переходной к Кузнецкой котловине, наблюдается большое разнообразие почв. Здесь наряду со слабоподзолистыми почвами таежных формаций встречаются серые лесные почвы лесостепи и оподзоленные черноземы, местами непосредственно, почти без переходов смыкающиеся с глубокоподзолистыми почвами тайги. Глубокоподзолистые почвы Салаира характеризуются серой окраской, ясно выраженной структурой, постепенными переходами от одного генетического горизонта к другому[19].

2.2 Подготовка данных дистанционного зондирования к анализу

2.2.1 Программное обеспечение, используемое в работе

Выбор программных средств зависит от решаемых задач, объемов данных, предполагаемых к обработке, и квалификации исполнителей. В настоящее время обработка ДДЗ ведется преимущественно средствами программных пакетов, специально предназначенных для этого. Часто такие программы обеспечивают не только извлечение информации из снимков, но и отображение ее на картографической основе, а также интеграцию с данными ГИС. Мониторинг и изучение динамики объектов наиболее эффективно может быть осуществлен на основе применения ГИС-технологий. Рассмотрим программные пакеты, которые применялись в данной работе.

Программный пакет ERDAS Imagine предназначен для работы с данными дистанционного зондирования Земли. Выполнен в виде растрового графического редактора, с множеством специфических функций. Основная задача ERDAS Imagine состоит в подготовке картографических изображений для дальнейшего использования в программах ГИС. С помощью данного приложения возможно обнаружение особенностей местности, которые не заметны при обычном просмотре [15]. Становится возможным определение координат объектов, находящихся на растровом снимке. Исследуя уровень

яркости и состав отражённого света от поверхности Земли, возможно определение минерального состава почвы и типа растительного покрова [15]. Кроме того, возможно создание пространственной модели из растровых снимков, с автоматическим извлечением географических данных. Поддерживается получение стереоскопических изображений. Возможно создание из множества изображений мозаики [15]. ERDAS Imagine предлагает широкие возможности импорта/экспорта, способен конвертировать растровые изображения в векторные .

ArcGIS — это система для построения ГИС любого уровня.

ArcGIS Интегрированный набор программных ГИС-продуктов для создания полноценной современной ГИС. Фундаментальная архитектура ESRI ArcGIS обеспечивает внедрение ГИС-функциональности и бизнес-логики (процедур использования пространственных данных) в разных прикладных сферах, на разных уровнях организации работы: на персональных компьютерах, на серверах, через Web, или в полевых условиях. Поддерживается как работа отдельных пользователей, так и многопользовательский режим обработки и анализа данных [16].

ArcGIS является масштабируемым набором программ с одинаковым базовыми приложениями и пользовательским интерфейсом. Ключевыми приложениями ArcGIS являются ArcMap, ArcCatalog и ArcToolbox. ArcMap используется для работы с пространственными данными и создания картографического продукта. ArcCatalog предназначен для поиска и управления пространственными данными. ArcToolbox обеспечивает средства конвертации и геообработки данных. Каждая программа, входящая в ArcGIS, включает в себя все эти три приложения. Функциональность программ постепенно наращивается по мере перехода от ArcView к ArcEditor и далее к ArcInfo. В результате ArcView и ArcInfo объединены на единой интегрированной платформе, построены в соответствии с общей архитектурой и имеют одинаковый пользовательский интерфейс. Эта единая платформа для создания, управления и анализа географических данных значительно повышает удобство

использования и взаимодействие между программами, которые в прошлом очень отличались по своим программным средам [21]

ArcGIS дает возможность легко создавать данные, карты, глобусы и модели в настольных программных продуктах, затем публиковать их и использовать в настольных приложениях, веб-браузерах и мобильных устройствах. Разработчикам ArcGIS дает все необходимые инструменты для создания собственных приложений для различных платформ [7]. ArcGIS позволяет визуализировать (представить в виде цифровой карты). Программа работает с такими файлами, как: GMF, .IMG, .GEN, .SSF, .TAB, .ADF, .IDX, .IMD, .SHX, .ECW, .DGN, .KML, .KMZ и многие другие.

Программный комплекс ENVI — профессиональное решение для комплексной обработки мультиспектральных, гиперспектральных и радарных данных, продуктов для визуализации, анализа и обработки данных ДЗЗ, включающих набор инструментов для проведения полного цикла обработки данных — от ортотрансформирования и пространственной привязки изображения до получения необходимой информации и ее интеграции с данными геоинформационных системы. Программный комплекс ENVI лицензирован ведущими операторами космических данных и обеспечивает поддержку данных ДЗЗ, полученных со спутников WorldView-1,2, GeoEye-1, QuickBird, IKONOS, обработка данных ДЗЗ 51 GEOMATICS №2'2013 RapidEye, ALOS, Pleiades-1A,1B, Cartosat-1, Landsat (в том числе Landsat 8), EO-1 (ALI, Hyperion) и др. ПК ENVI и его дополнительные модули включают эффективные инструменты специализированной обработки и анализа как мультиспектральных, гиперспектральных, так и радарных данных. Многие алгоритмы анализа изображений в программном комплексе ENVI были специально разработаны для обработки больших объемов информации [3].

2.2.2 Данные, используемые в работе

С геопортала Геологической службы США были импортированы снимки спутника Landsat8 на территорию Кузнецкого Алатау и смежных хребтов - Абаканского и Салаирского кряжа в формате GeoTIFF [13].

Программа Landsat является наиболее продолжительным проектом по получению спутниковых фотоснимков Земли. Установленное на спутниках Landsat оборудование сделало миллиарды снимков. Эти снимки являются уникальным ресурсом для проведения множества научных исследований в области сельского хозяйства, картографии, геологии, лесоводства, образования и национальной безопасности [14].

Спутник Landsat 8 оснащен двумя сенсорами: OLI (Operational Land Imager) и TIRS (Thermal Infrared Sensor), которые имеют более высокое отношение сигнал-шум и поэтому имеют радиометрическое разрешение 12 бит. В OLI используются длинные линейные массивы фотодатчиков, снимающие сразу всю ширину поля зрения спутника – 185 км. Прибор OLI работает в 9 спектральных диапазонах, представленных в таблице 1 [14].

Таблица 1– Спектральные диапазоны OLI.

Спектральный канал	Длины волн, мкм	Пространственное разрешение, м
1	2	3
Канал 1 — Побережья и аэрозоли (Coastal / Aerosol, New Deep Blue)	0.433 — 0.453	30
Канал 2 — Синий (Blue)	0.450 — 0.515	30
Канал 3 — Зелёный (Green)	0.525 — 0.600	30
Канал 4 — Красный (Red)	0.630 — 0.680	30
Канал 5 — Ближний ИК (Near Infrared, NIR)	0.845 — 0.885	30
Канал 6 — Ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 2)	1.560 — 1.660	30

Продолжение таблицы 1

1	2	3
Канал 7 — Ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 3)	2.100 — 2.300	30
Канал 8 — Панхроматический (Panchromatic, PAN)	0.500 — 0.680	15
Канал 9 — Перистые облака (Cirrus, SWIR)	1.360 — 1.390	30

Landsat 8 OLI получает изображения в видимом, в ближнем ИК и в среднем ИК диапазонах электромагнитных волн, с пространственным разрешением 30 метров [14].

2.2.3 Атмосферная коррекция

После получения космоснимков на исследуемую территорию была проведена атмосферная коррекция снимков. Данная операция выполняется с целью получения изображения с учетом особенностей получения каждого снимка.

Для выполнения атмосферной коррекции снимок необходимо открыть с использованием файла метаданных, также нужно подготовить данные к обработке в инструменте FLAASH с помощью инструмента Radiometric Calibration. Данный инструмент пересчитывает значения пикселей (DN) в значения яркости на сенсоре (Radiance), переводит значение Radiance из $\text{w}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ в $\text{microWatts}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$, переводит данные из формата BSQ в формат BIL, BIP. После выполнения инструмента Radiometric Calibration, был применен модуль FLAASH. В котором были выставлены необходимые параметры, а именно тип сенсора, дата снимка, координаты центра снимка, значение видимости, модель аэрозолей, модель атмосферы. Для устранения влияния аэрозолей был применен метод Кауфмана. Данный метод

предполагает, что влияние аэрозолей на значения яркостей минимально в среднем инфракрасном диапазоне (отражение менее 0,1), а в видимом диапазоне – существенно. Эмпирически он установил значение яркости в этих каналах равным 0,45. В случае, если темные пиксели на изображении не обнаружены – в качестве значения параметра видимости используется значения поля Initial Visibility (км). После задания необходимых настроек в модуле FLAASH и выполнения данного модуля, получили изображение с атмосферной коррекцией. Атмосферная коррекция была проведена для всех сцен территории Кузнецкого Алатау и смежных хребтов – Абаканского и Салаирского кряжа. После выполнения атмосферной коррекции улучшилось визуальное восприятие изображения (рисунки 3 и 4)



Рисунок 3 – Изображение сцены 144/21 до атмосферной коррекции

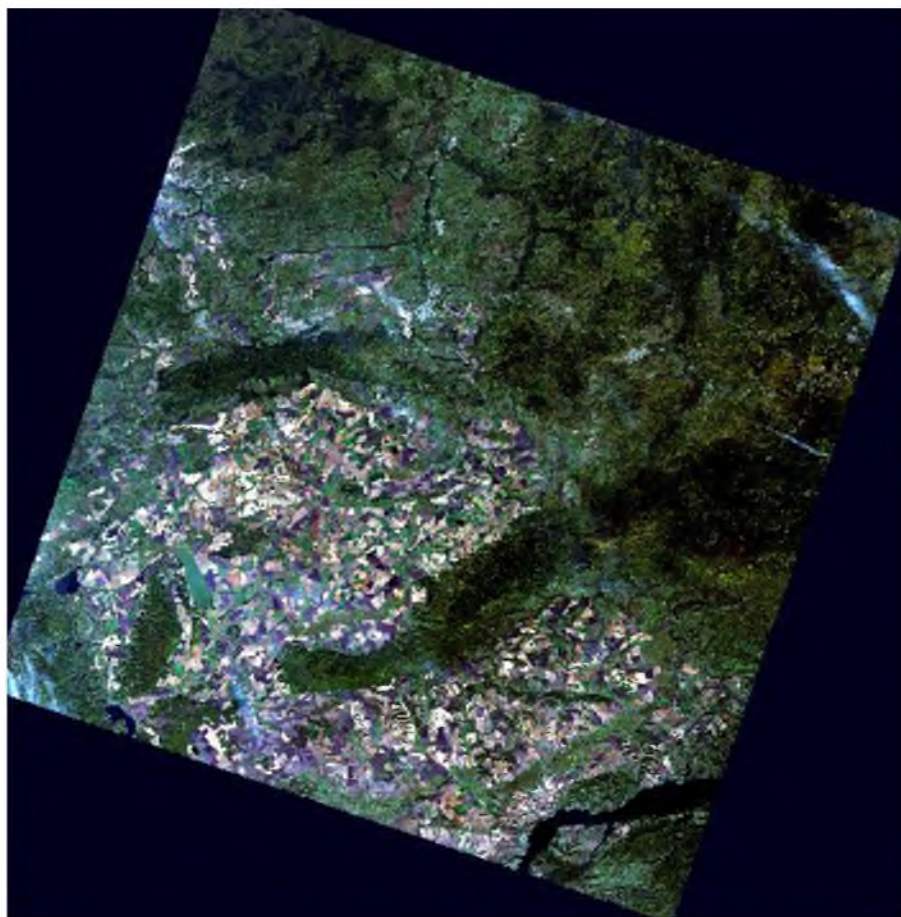


Рисунок 4 – Изображение сцены 144/21 после атмосферной коррекции

Для отображения используются второй, третий и четвёртый каналы прибора в режиме RGB.

2.3 Цифровая модель рельефа

Для анализа характеристик рельефа на территории с усохшими лесами с геопортала Геологической службы США были импортированы данные SRTM (Shuttle radar topographic mission, международная миссия по получению данных цифровой модели рельефа территории Земли) с разрешением 1 секунда дуги на территорию Кузнецкого Алатау и смежных хребтов - Абаканского и Салаирского кряжа [13].

2.4 Карты растительного покрова, используемые в работе

2.4.1 TerraNorte

Карта растительного покрова TerraNorte RLC была получена автоматизированным методом картографирования растительного покрова на основе данных спутниковых наблюдений за 2010 год спектрорадиометром MODIS. В основу метода положено использование предварительно очищенных от влияния облаков и других мешающих факторов многолетних временных серий данных спутниковых измерений спектрально-отражательных характеристик земного покрова с автоматическим распознаванием его типов на основе алгоритма локально-адаптивной классификации с обучением LAGMA. Созданная на основе разработанного метода новая карта, получившая название TerraNorte RLC, отражает пространственное распределение растительного покрова на территории России и имеет пространственное разрешение 250 м. Легенда карты содержит 22 тематических класса, из которых 18 соответствуют различным типам растительности. Данная карта была использована для выделения темнохвойных лесов на космоснимках Landsat [2].

2.4.2 Карта динамики лесного покрова

Карта была составлена на основе исследований глобальных данных Landsat с 30-метровым пространственным разрешением. По данным карты известно, что с 2000 по 2012 год 2,3 млн. км² леса были потеряны и на 0,8 млн. км² осуществился прирост леса. Общая площадь потери и прироста леса составляет 3,1 млн. км² [24] (рисунок 5).

Также на карте можно посмотреть результаты анализа временных рядов изображений Landsat, характеризующих потерю лесного покрова в период с 2000 по 2014 год. В данной работе с помощью карты были подтверждены

изменения в лесном покрове, а именно потеря лесного покрова определенных участков исследуемой территории [32].

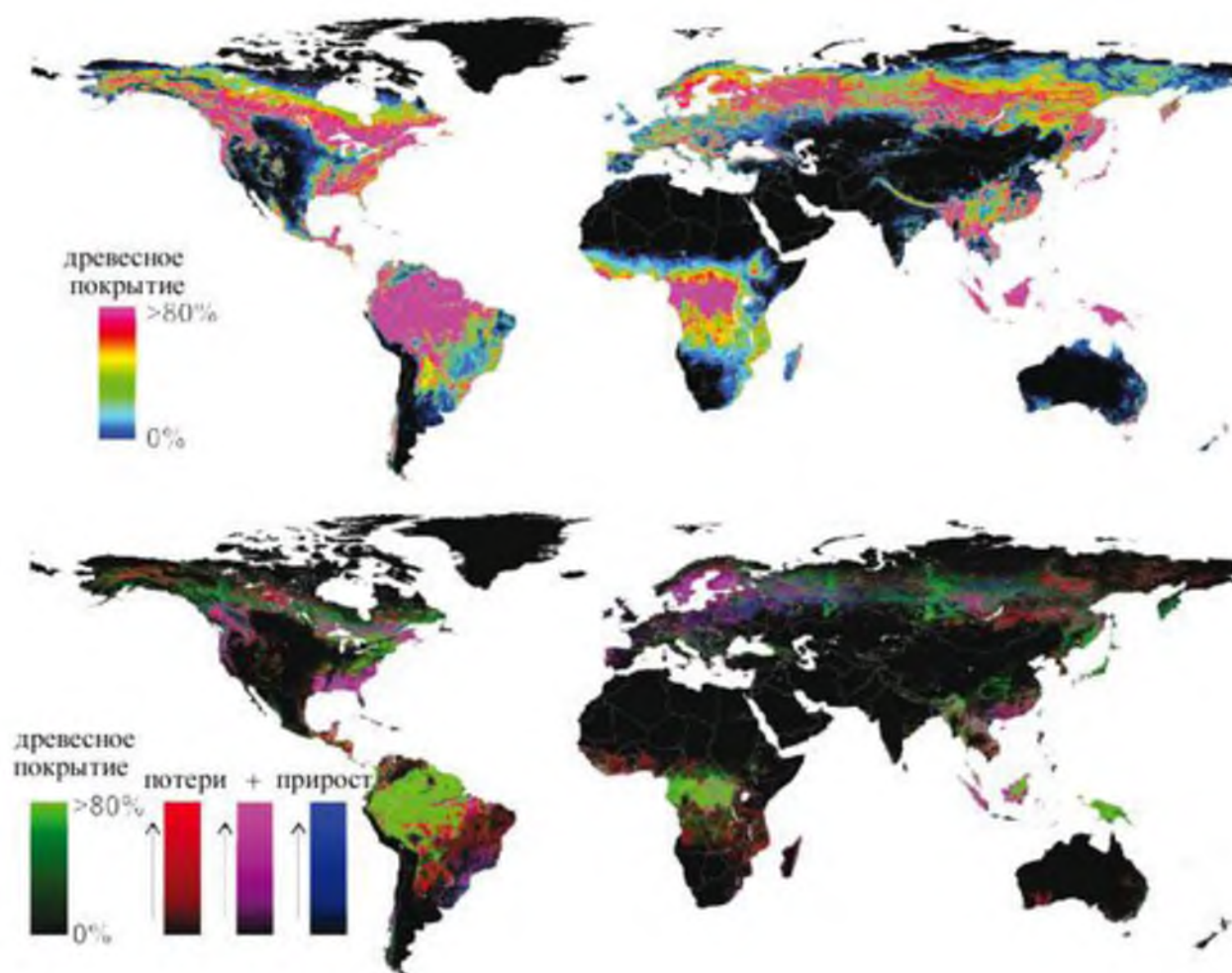


Рисунок 5 – Карта динамики лесного покрова, показывающая изменение лесного покрова с 2000 по 2012 г

Потери лесов отмечены в экваториальных лесах, а также в бореальных лесах Европы и Азии.

2.5 Данные высокого пространственного разрешения, получаемые с помощью программы SASPlanet

SASPlanet – свободная программа, предназначенная для просмотра и загрузки спутниковых снимков высокого разрешения и обычных карт,

представляемых такими сервисами, как Google Earth, Google Maps, Bing Maps, DigitalGlobe, Космоснимки, Яндекс.карты, Yahoo! Maps, VirtualEarth, Gurtam, OpenStreetMap, eAtlas, iPhone maps, карты Генштаба и др. Загрузка карт осуществляется как выделением некоторой области (возможно непрямоугольной), так и в процессе перемещения по карте. Карты и снимки часто обновляются – программа позволяет загружать только самые новые космоснимки. С помощью данной программы можно просмотреть исследуемую область на нескольких картах и спутниковых снимках. Также с помощью данной программы можно создать метки, которые впоследствии легко скачать как файл в формате kmz [23].

2.6 Построение мозаики снимков с темнохвойными лесами

Была вырезана часть карты растительного покрова TerraNorte RLC, а именно территория Кузнецкого Алатау и смежных хребтов - Абаканского и Салаирского кряжа с помощью инструмента Create Subset Image.

После выполнения атмосферной коррекции из каждого снимка маской вырезалась часть снимка, соответствующая классам темнохвойных, темнохвойно-лиственных и смешанных лесов. В качестве маски использовалась вырезанная часть карты TerraNorte RLC (рисунок 6).

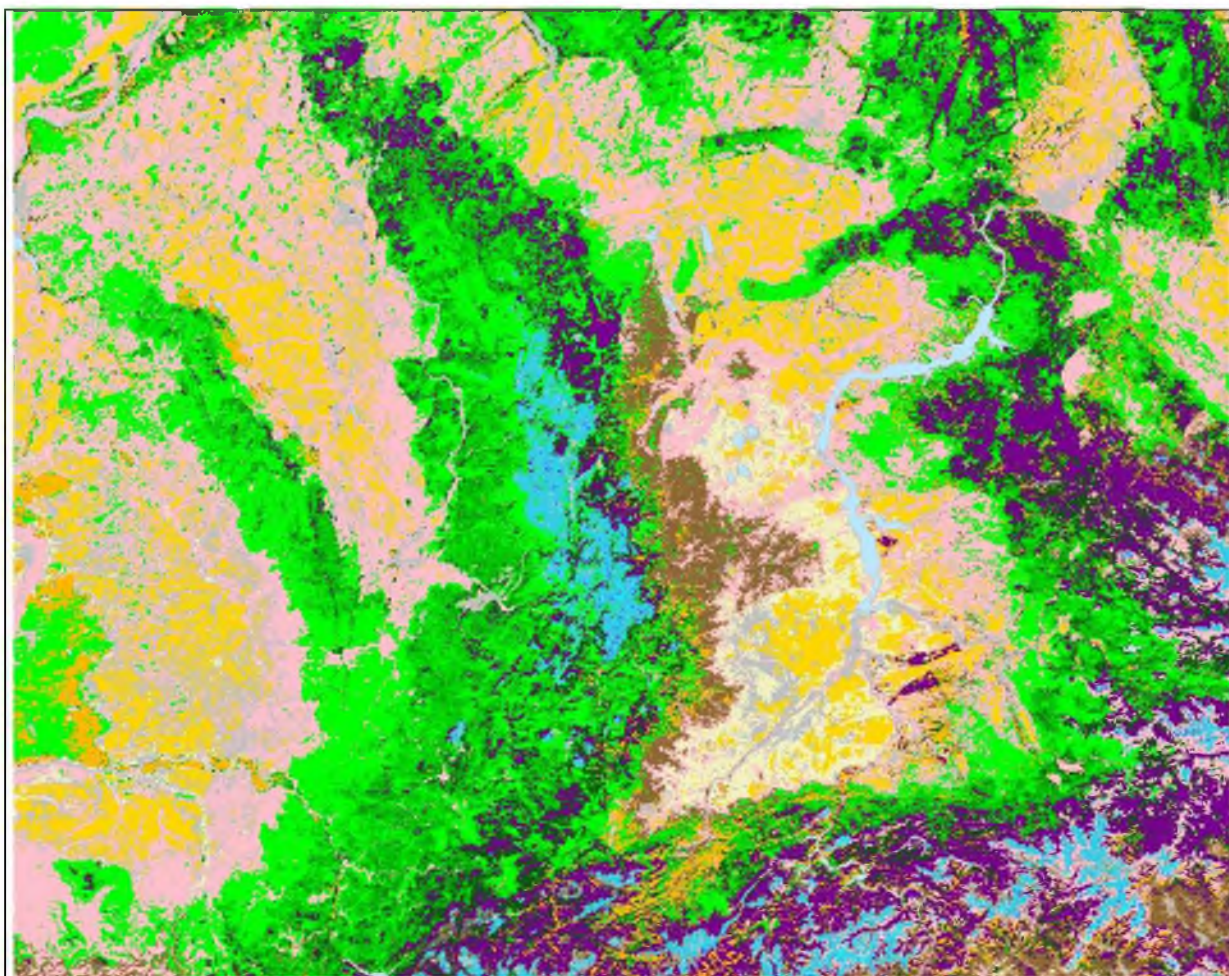


Рисунок 6 – Часть карты TerraNorte RLC

После извлечения по маске фрагментов снимков, соответствующих темнохвойным и смешанным лесам, для всех сцен была собрана мозаика с помощью инструмента Mosaic в программном комплексе ERDAS Imagine (рисунок 7).

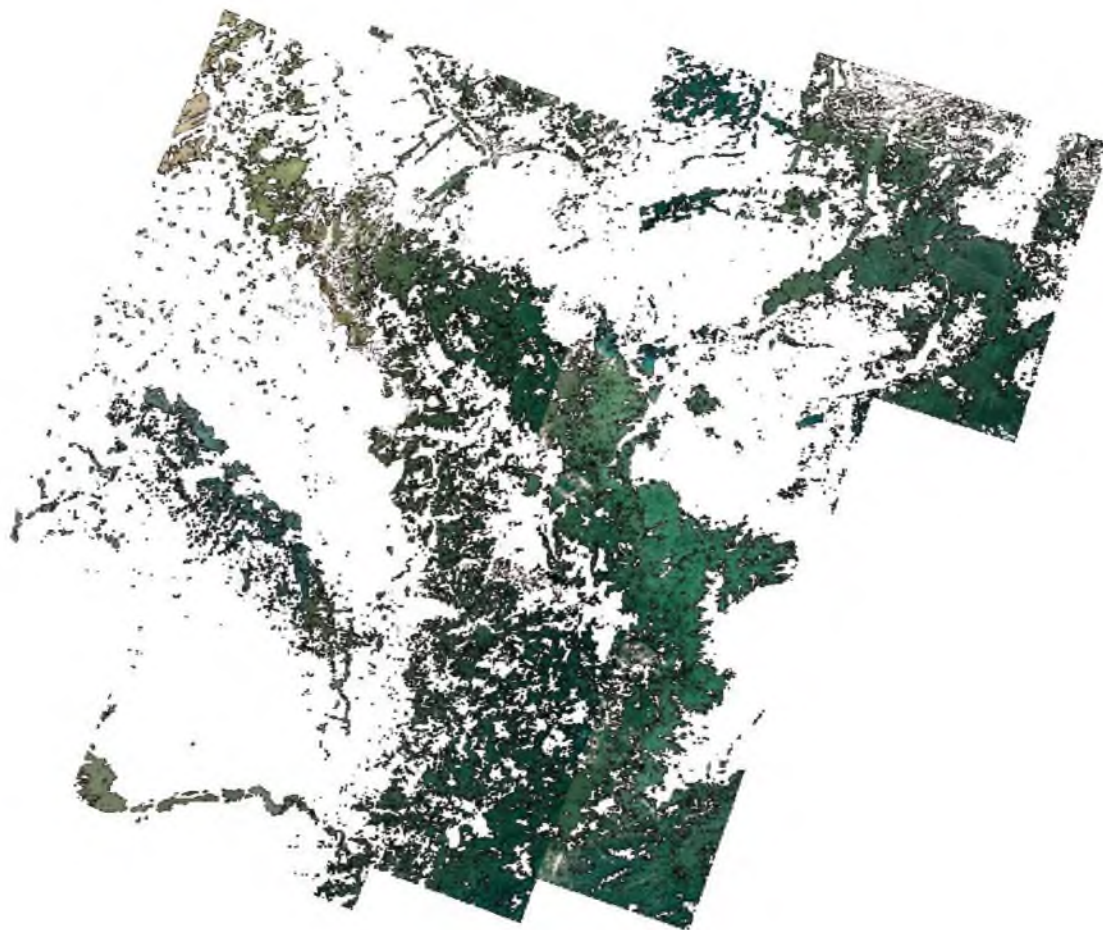


Рисунок 7 – Мозаика из снимков Кузнецкого Алатау и смежных хребтов -
Абаканского и Салаирского кряжа

После получения мозаики из снимков данная территория была ограничена территорией Кузнецкого Алатау и смежных хребтов - Абаканского и Салаирского кряжа с помощью инструмента «Извлечь по маске» в программном комплексе ArcGIS (рисунок 8).

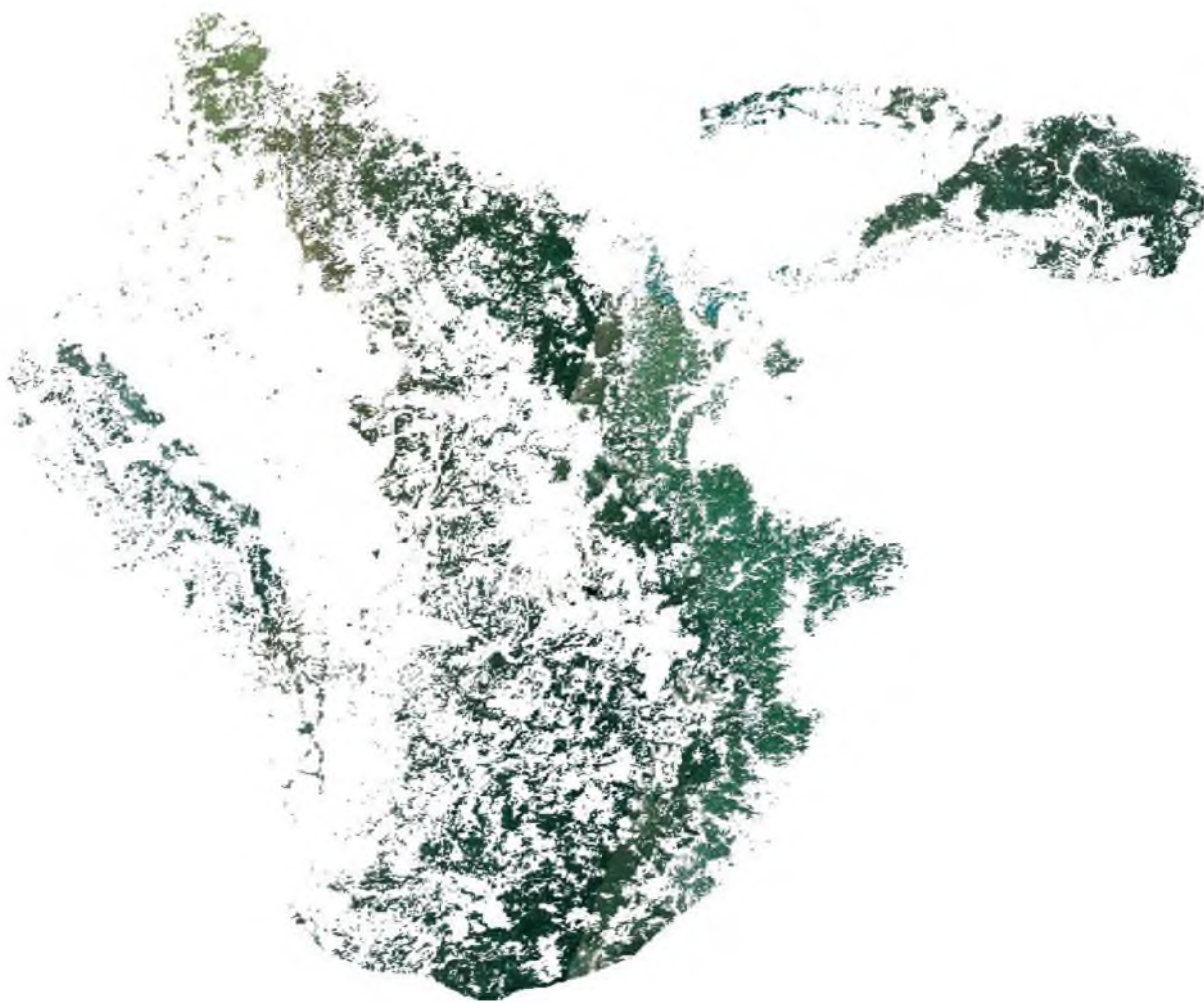


Рисунок 8 – Территория темнохвойных и смешанных лесов Кузнецкого Алатау и смежных хребтов - Абаканского и Салаирского кряжа

После проведенной подготовки данных можно переходить к картированию усохших лесов.

3 Картирование усохших лесов по снимкам Landsat

3.1 Признаки, использовавшиеся для выделения усохших древостоев

3.1.1 Вегетационный индекс нормированной разности NDVI

Вегетационный индекс нормированной разности NDVI - один из самых распространенных и используемых индексов для решения задач

количественной оценки растительного покрова. Вегетационный индекс в определенной точке изображения равен разнице интенсивностей отраженного света в видимом и инфракрасном диапазоне, деленной на сумму их интенсивностей. Расчет NDVI базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. В видимой области спектра (0,4-0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области (0,7-1,0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. То есть высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведет к меньшему отражению в видимой области спектра и большему в инфракрасной. Отношение этих показателей друг к другу позволяет отделять здоровую растительность от угнетенной (рисунок 9).

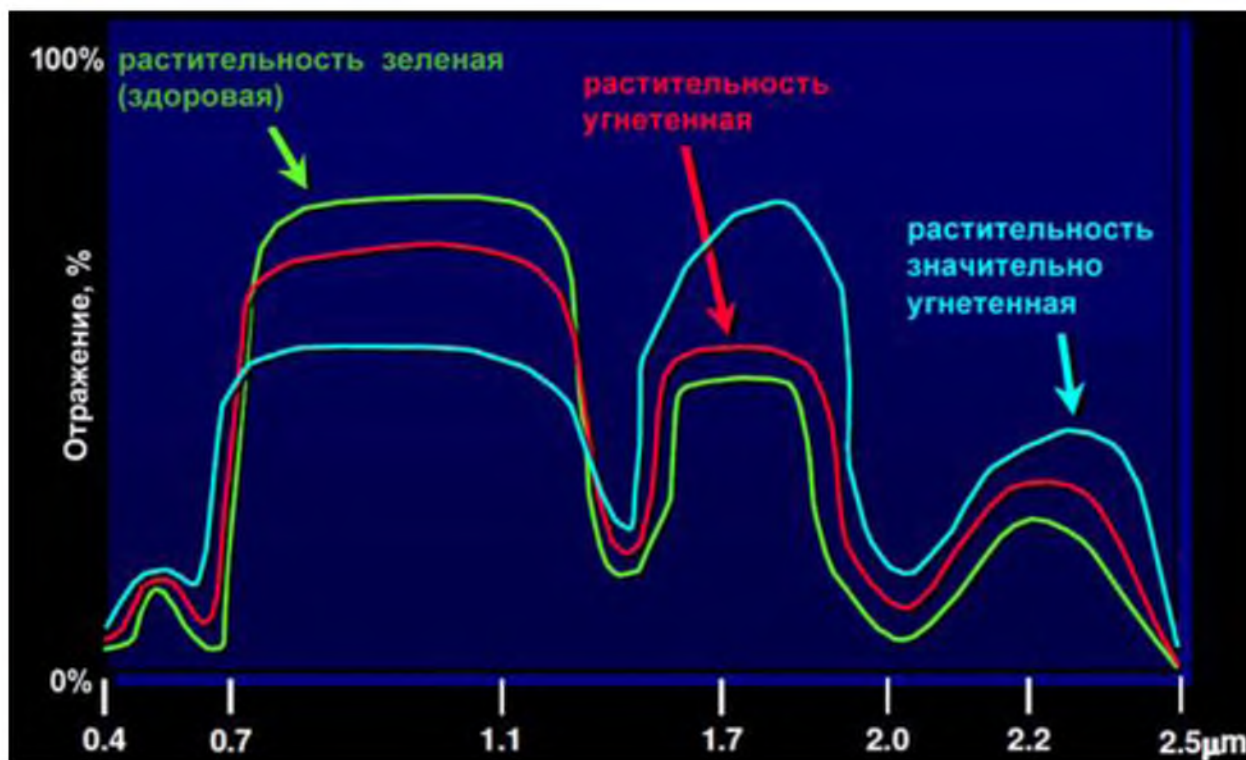


Рисунок 9 – Спектральные кривые здоровой, угнетенной и сильно угнетенной растительности

Использование же не простого отношения, а нормализованной разности между минимумом и максимумом отражений увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние таких явлений как различия в освещенности снимка, облачности, дымки, поглощение радиации атмосферой и пр [22].

После получения индекса NDVI, чтобы проверить статистическую значимость различия индексов у здоровых и усохших лесов, был применен t-критерий Стьюдента. Для этого вычислили эмпирические значения по формуле t-критерия Стьюдента для независимых выборок [20].

$$t_e = \frac{|M_1 - M_2|}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}}}, \quad (2)$$

где M_1 - среднее арифметическое первой выборки;

M_2 - среднее арифметическое второй выборки;

σ_1 - стандартное отклонение первой выборки;

σ_2 - стандартное отклонение второй выборки;

N_1 - объем первой выборки;

N_2 - объем второй выборки.

Стандартное отклонение представляет собой статистическую величину, характеризующую разброс данных относительно среднего значения.

Также был рассчитан доверительный интервал, чтобы более точно знать диапазон значений индекса NDVI усохших и здоровых лесов.

Доверительный интервал — термин, используемый в математической статистике при интервальной оценке статистических параметров, более предпочтительной при небольшом объёме выборки, чем точечная. Доверительным называют интервал, который покрывает неизвестный параметр с заданной надёжностью [17].

3.1.2 Коротковолновой индекс SWVI

Другим распространенным индексом, характеризующим состояние растительного покрова, является коротковолновый вегетационный индекс SWVI (5–6 каналы для Landsat 8), вычисляемый по аналогии с NDVI по формуле

$$SWVI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \quad (3),$$

где NIR – отражение в ближней ИК области,

$SWIR$ – отражение в средней ИК области.

Средняя ИК область спектра отражает изменение влагосодержания растения, а также изменения структуры полога насаждения и структуры листьев, в то время как отражение в ближнем ИК диапазоне спектра зависит от внутренней структуры листа и не зависит от насыщенности его влагой. Таким образом, совместное использование данных измерений в этих двух областях спектра повышает точность оценки влагосодержания растения, компенсируя влияние, оказываемое структурой листа [30].

Участки лесной растительности, которые были повреждены, характеризуются пониженной спектральной яркостью в ближней инфракрасной зоне и повышенной в средней инфракрасной зоне.

3.1.3 Метод главных компонент

Метод главных компонент (РСА) часто используется как метод сжатия данных. Компоненты данных РСА являются некоррелированными и независимыми и часто более интерпретируемы, чем исходные данные.

Преобразование главных компонент является таким преобразованием, когда исходные каналы переводятся в систему новых признаков, в которой данные не имеют корреляционных связей. Если представить x и y старыми и

новыми координатами исходных спектральных и новых признаков, то преобразование главных компонент можно записать в виде

$$y = G x,$$

где G – матрица линейного преобразования.

Мы должны получить в пространстве новых признаков диагональную матрицу ковариации, которая определяется следующим образом:

$$\Sigma_y = G \Sigma_x G^t,$$

где Σ_x – матрица ковариации в исходном пространстве спектральных признаков.

Это возможно в случае, если Σ_y является диагональной матрицей собственных векторов матрицы Σ_x .

$$\Sigma_y = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \mathbf{0} \\ 0 & \ddots & 0 \\ \mathbf{0} & 0 & \lambda_N \end{pmatrix}.$$

N – это размерность пространства спектральных признаков (число спектральных каналов). Диагональные элементы упорядочены так, что $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_N$. Максимум изменчивости нового пространства признаков проявляется по первой координате y_1 , минимум – по последней y_N . Чтобы построить матрицу преобразования главных компонент, необходимо найти ковариационную матрицу спектральных каналов, затем найти ее собственные значения, затем найти собственные векторы, соответствующие собственным значениям, и из них построить матрицу преобразования G . Эти вопросы рассматриваются в учебниках по линейной алгебре. Программно они реализованы во всех пакетах обработки изображений.

Величины собственных значений λ_i являются характеристикой количества информации, содержащейся в i -ой компоненте. Это количество информации для i -ой компоненты определяется выражением

$$I_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^N \lambda_j},$$

где N – количество компонент.

3.1.4 Индекс гарей NBR

Полученный в результате вычисления индексов слой с вероятными усыханиями включает в себя и ошибочные участки, близкие по спектральным характеристикам к усыханиям, в частности гары. Для того, чтобы убрать ошибочно определенные участки усыханий, необходимо рассчитать индекс гарей.

Индекс гарей NBR представляет собой разность спектральных отражений в ближнем и коротковолновом инфракрасных каналах, нормализованную на их сумму.

$$NBR = \frac{NIR - FIR}{NIR + FIR},$$

где NIR - спектральный канал 5 для Landsat-8,

FIR - спектральный канал 7 для Landsat-8.

Нормализованный индекс гари NBR имеет диапазон значений от -1 до +1. В ненарушенных лесных насаждениях этот показатель имеет положительные значения, на открытых и поврежденных пожарами участках – отрицательные. Значение NBR имеет тенденцию к снижению при увеличении степени поврежденности растительного покрова [6].

3.2 Выделение усохших древостоев с помощью NDVI

Для выявления усыхания лесов необходимо рассчитать индекс NDVI. Для этого в программном комплексе ERDAS Imagine был применен инструмент Indices, в результате его выполнения было получено изображение, на котором территория, которая имеет индекс NDVI от 0,5 до 0,7, вероятно имеет усыхания. Территория, которая имеет индекс NDVI приблизительно от 0,7 до 1, является территорией здоровых лесов.

После получения индекса NDVI, чтобы проверить различие индексов у здоровых и усохших лесов был применен t-критерий Стьюдента для двух независимых выборок. В качестве первой выборки использовались индексы NDVI усохших лесов, в качестве второй выборки - индексы NDVI здоровых лесов.

Таблица 2 – Индекс NDVI здоровых и усохших лесов

0,620	0,859
0,606	0,86
0,685	0,861
0,664	0,862
0,658	0,863
0,674	0,864
0,679	0,865
0,684	0,866
0,675	0,867
0,665	0,868
0,697	0,869
0,673	0,87
0,649	0,871
0,681	0,872
0,702	0,873
0,694	0,874
0,620	0,859

С помощью программы Excel были получены значения доверительного интервала и критерия Стьюдента (таблица 3).

Таблица 3 – Значения критерия Стьюдента и доверительного интервала

	Усыхающий лес	Здоровый лес
Среднее значение	0,6458	0,8357
Среднее стандартное отклонение	0,0304	0,0071
Доверительный интервал при 95%	0,0119	0,0028
Критерий Стьюдента	30,496	

Степень свободы равна сумме двух выборок. Так как обе выборки состоят из 25 значений, степень свободы равна 50. С помощью таблицы критических значений t-Стьюдента был определен уровень значимости. При степени свободы 50 и уровне значимости 0,001 теоретическое значение = 3,496. Так как полученный критерий Стьюдента $30,496 > 3,496$, делается вывод о наличии различий между усохшими и здоровыми лесами.

3.3 Выделение усохших древостоев с помощью индекса SWVI

Для того, чтобы более точно определить усыханий темнохвойных лесов, был применен индекс SWVI. С помощью инструмента Model Maker в программном комплексе ERDAS Imagine была создана схема (рисунок 10), с помощью которой был рассчитан индекс SWVI.

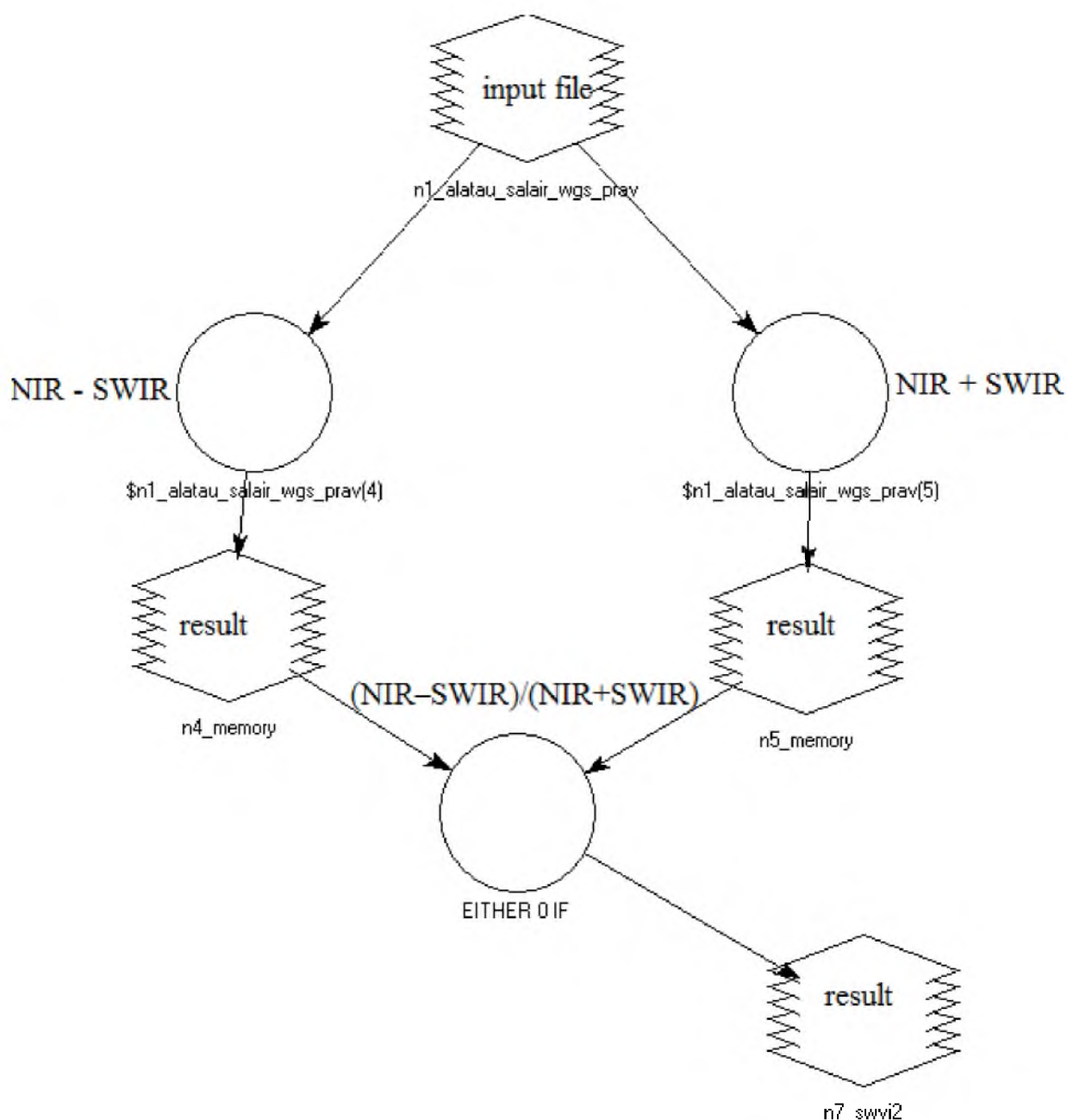


Рисунок 10 – Схема расчета индекса SWVI

Опытным путем было установлено, что у территорий с усыханиями индекс находится в диапазоне от -0,05 до 0,2.

Для того, чтобы сравнить усыхания, полученные с помощью NDVI, и усыхания, полученные с помощью SWVI, на слой с усыханиями, полученными с помощью NDVI, был наложен слой с усыханиями, полученными с помощью SWVI. Усыхания, полученные с помощью NDVI, отображаются красным цветом, с помощью SWVI - черным цветом (рисунок 11).

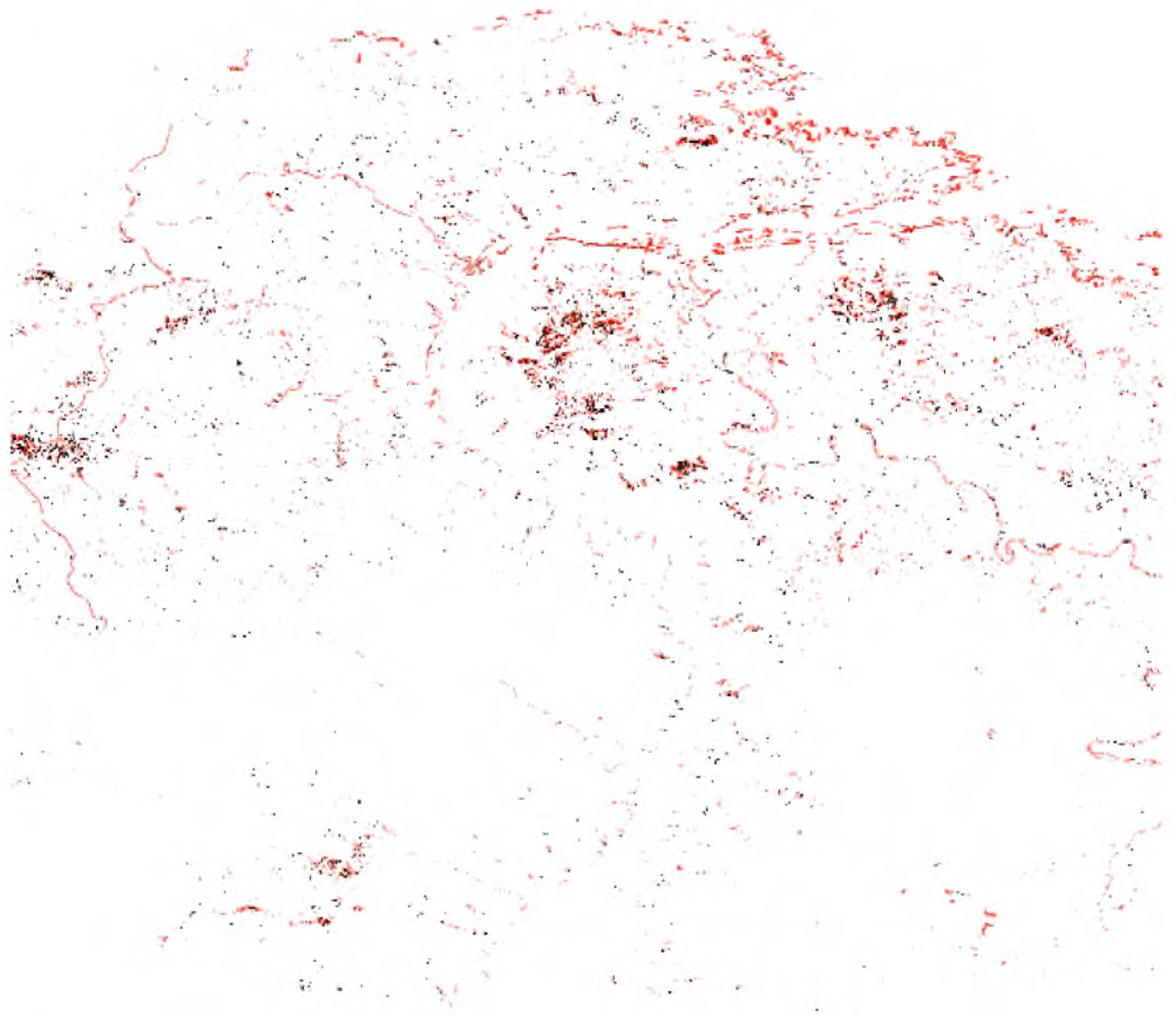


Рисунок 11 – Часть исследуемой территории с усыханиями, полученными с помощью NDVI и SWVI

Территории с усыханиями, которые были получены с помощью индекса SWVI, соответствуют территориям с усыханиями, полученными с помощью индекса NDVI. Однако усыханий, полученных с помощью индекса NDVI, больше.

Для того, чтобы узнать, насколько точно были определены усыхания, необходимо сравнить полученные усыхания со снимками высокого пространственного разрешения в программе SASPlanet.

3.5 Выделение усохших древостоев с помощью метода главных компонент.

С помощью инструмента Principal component в программном комплексе ERDAS Imagine были выявлены возможные усыхания древостоев (рисунок 12).

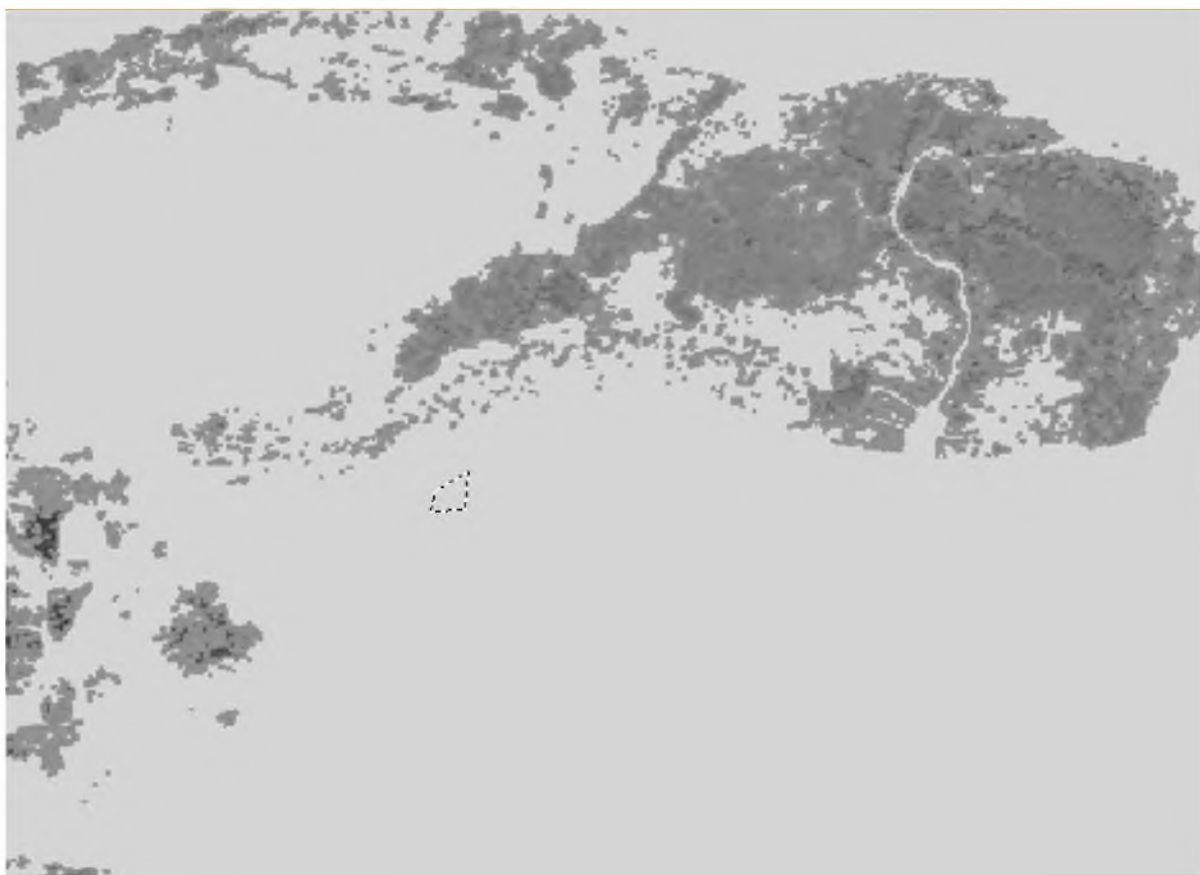


Рисунок 12 – Изображение, полученное с помощью метода главных компонент

С помощью метода главных компонент сложнее определить усыхания, так как они отображаются визуально менее заметно.

3.6 Выделение территорий с гарями.

Для исключения территорий с гарями был применен индекс NBR. Для этого в программном комплексе ERDAS Imagine с помощью инструмента Model Maker была составлена схема определения гарей (рисунок 13).

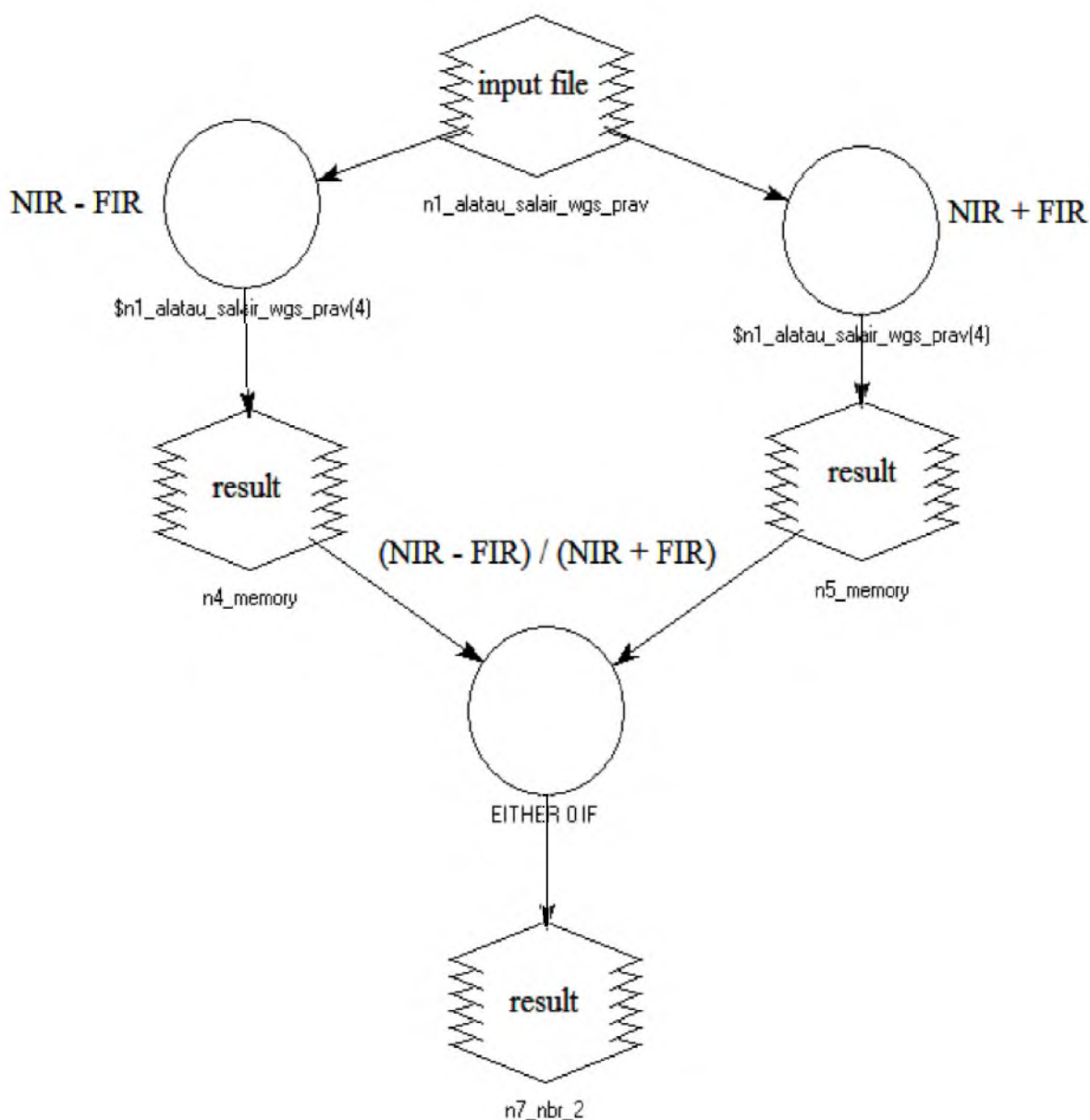


Рисунок 13 – Схема расчета индекса гарей NBR

Опытным путем установлено, что значение индекса для участков с высокой степенью вероятности обнаружения на них гарей находятся в диапазоне от -0,4 до 0,3. С помощью инструмента Model Maker были выделены участки с гарями. К территории с гарями также попали облака (рисунок 14)

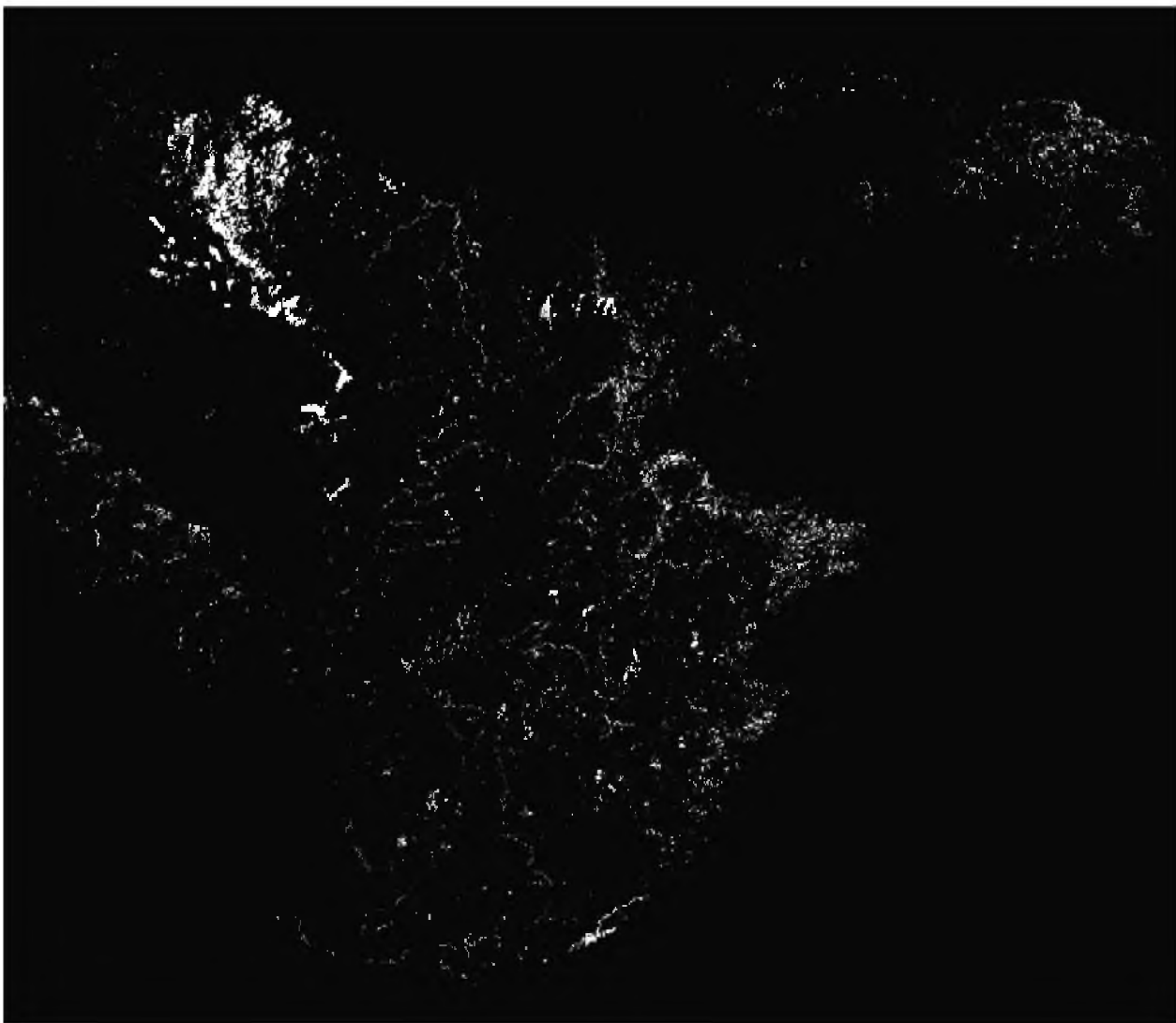


Рисунок 14 – Участки с гарями на исследуемой территории

Для того, чтобы исключить гари с рассматриваемой территории, был применен инструмент «Извлечь по маске» в программном комплексе ArcGIS. В качестве маски был использован слой NBR, в котором исключены участки с индексом в диапазоне от -0,4 до 0,3.

3.6 Выделение усохших древостоев с помощью программы SasPlanet

Для более тщательного анализа территории на наличие усыханий и для проверки точности выделения усохших лесов необходимы проверочные данные, в качестве которых использовались космоснимки с высоким

пространственным разрешением. Данные снимки можно найти в программе SASPlanet. С помощью этой программы был создан векторный точечный слой усыхающих древостоев (рисунок 15).

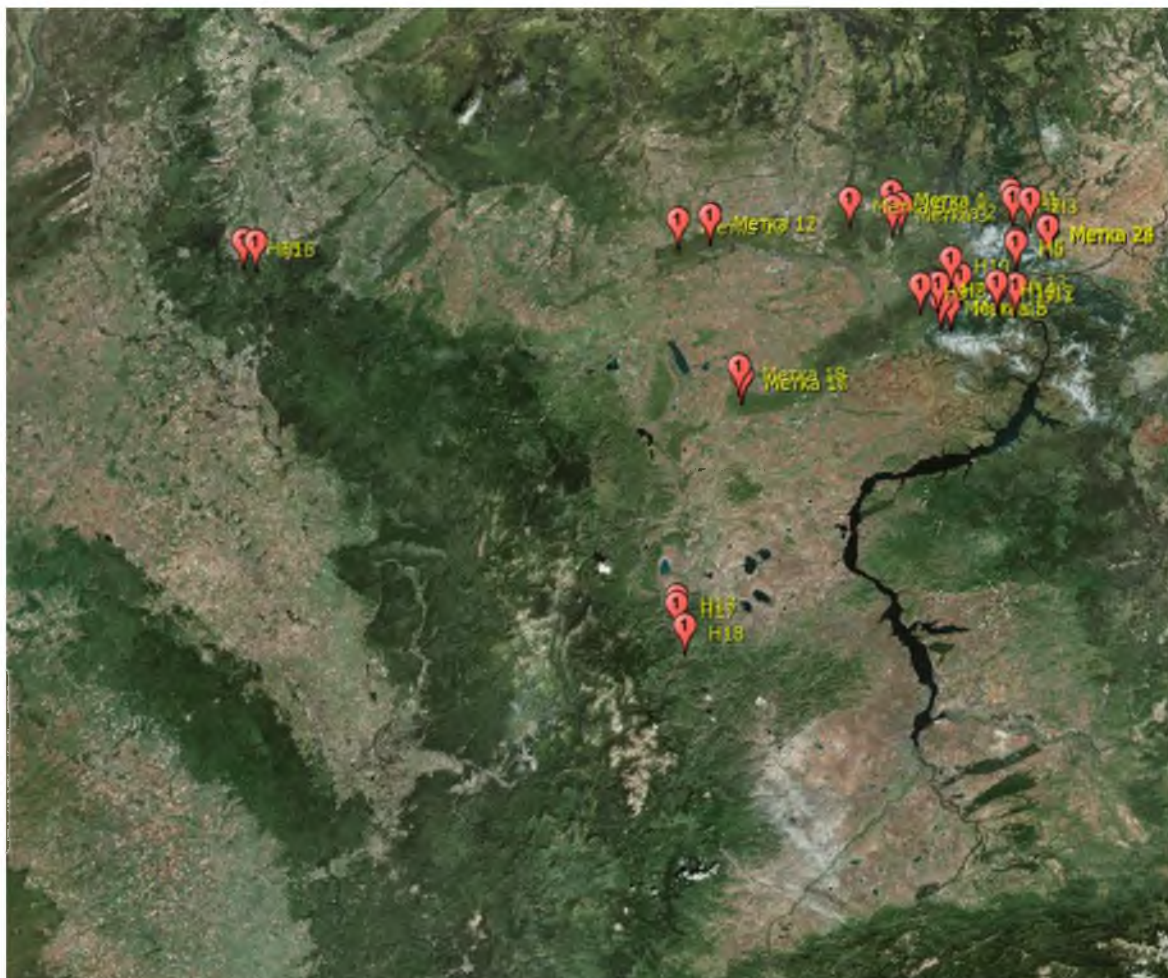


Рисунок 15 – Снимок в программе SASPlanet с метками усыхания

После визуального сравнения полученных усыханий со снимками высокого пространственного разрешения в программе SASPlanet, было выявлено, что усыхания, полученные с помощью индекса SWVI, более точны.

3.7 Сравнение территорий с усохшими древостоями с картой динамики лесного покрова 2000-2014 годов

После исключения гарей с исследуемой территории и получения усыханий с помощью индексов NDVI и SWVI, полученные результаты были

сопоставлены с картой динамики лесного покрова. Полученные усыхания на этой карте отмечены как изменения.

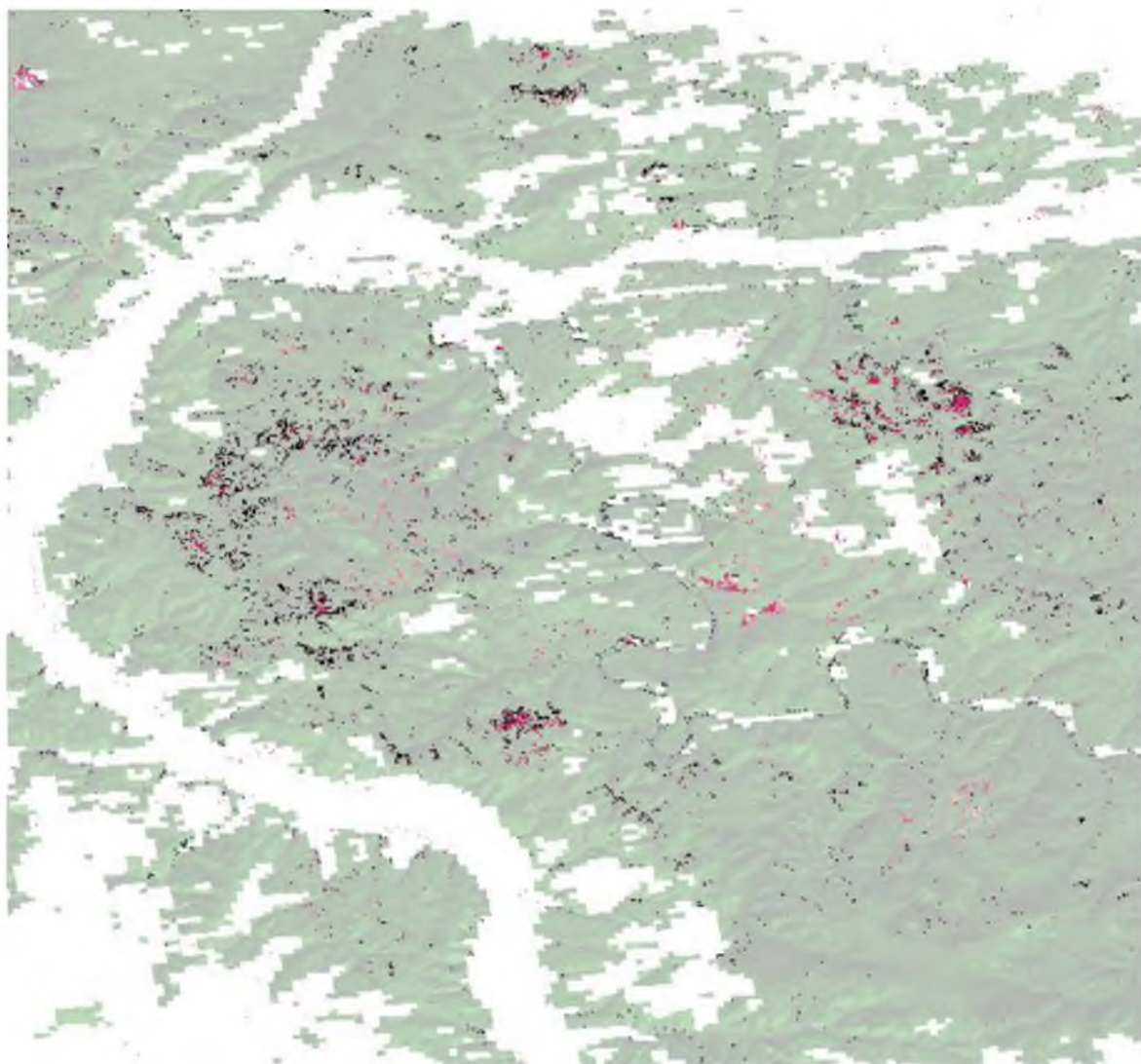


Рисунок 16 – Часть исследуемой территории с наложенной картой динамики лесов и полученными усыханиями

На рисунке выше розовым цветом отображается часть карта динамики лесного покрова, черным - полученные усыхания. Видно, что на рисунке усыхания и изменения на карте динамики лесного покрова практически совпадают. Также видно, что количество пикселей, показывающие изменения на карте динамики лесного покрова, преобладают над полученными

усыханиями, это объясняется тем, что карта динамики лесного покрова отображает не только усыхания, но и гари.

4 Анализ точности результатов, полученных разными методами

После исключения территории с гарями, усыхающие леса были выделены с помощью NDVI, SWVI, метода главных компонент. Полученные усыхания были сопоставлены снимкам высокого разрешения и карте динамики лесного покрова за 2000 -2014 г. Для определения точности усыхания полученные слой с усыханиями был классифицирован с помощью 2 классов, а именно усыхания – класс 2, и территория, на которой нет усохших лесов - класс 1. Для того, чтобы сравнить полученные усохшие территории со снимками высокого разрешения в программе SASPlanet, были расставлены метки с усыханиями, которые были определены визуально. Слой с метками был импортирован в формат kml и сконвертирован в формат txt. С помощью инструмента Accuracy Assesment была посчитана матрица ошибок. Сравнивались полученные данные усыханий с данными снимков высокого разрешения из программы SASPlanet (таблица 4). В таблице в поле class отображаются классы снимка Landsat (1- территория без усыханий, 2 – территория с усыханиями), поле Referanse – усыхания, полученные в программе SASPlanet, поле X координата широты, поле Y координата долготы. С помощью инструмента Accuracy Assesment была рассчитана точность классификации, которая равна 73,33% (рисунок 17).

Таблица 4 – Сравнение усыханий с данными снимков высокого разрешения

Point #	Name	X	Y	Class	Reference
1	ID#2	91.251	56.183	1	2
2	ID#3	91.322	56.132	1	2
3	ID#7	90.921	56.157	2	2
4	ID#8	89.554	56.062	2	2
5	ID#9	89.805	56.082	1	2
6	ID#10	89.807	56.083	2	2
7	ID#11	91.801	55.815	1	2
8	ID#12	91.639	55.703	2	2
9	ID#13	90.063	55.370	2	2
10	ID#14	90.063	55.369	2	2
11	ID#15	90.039	55.406	2	2
12	ID#16	92.489	56.024	2	2
13	ID#17	92.490	56.024	2	2
14	ID#19	92.489	56.024	2	2
15	ID#21	92.484	56.024	2	2

ACCURACY TOTALS

Class	Reference	Classified	Number	Producers
Name	Totals	Totals	Correct	Accuracy

Unclassified	0	0	0	---
Class 1	0	4	0	---
Class 2	15	11	11	73.33%
Totals	15	15	11	

Overall Classification Accuracy = 73.33%

----- End of Accuracy Totals -----

Рисунок 17 – Матрица ошибок для оценки точности классификации

Данный результат объясняется тем, что на снимках высокого пространственного разрешения видны незначительные усыхания, в то время как на космоснимках среднего пространственного разрешения незначительные усыхания не видны.

Для того, чтобы наглядно посмотреть точность усыханий, были отображены слои с усыханиями с полученными с помощью индекса NDVI, которые отмечены фиолетовым цветом, на данный слой был наложен слой с

усыханиями, полученными с помощью индекса SWVI, который отображается черным цветом с прозрачностью цвета 30%, чтобы определить пересекающиеся области усыхания. На слой с усыханиями, полученными с помощью индекса NDWI и SWVI, наложен слой с метками усыхания, полученными в программе SASPlanet. В качестве фона используется слой с исследуемой территорией с прозрачностью 60% (рисунки 18, 19).

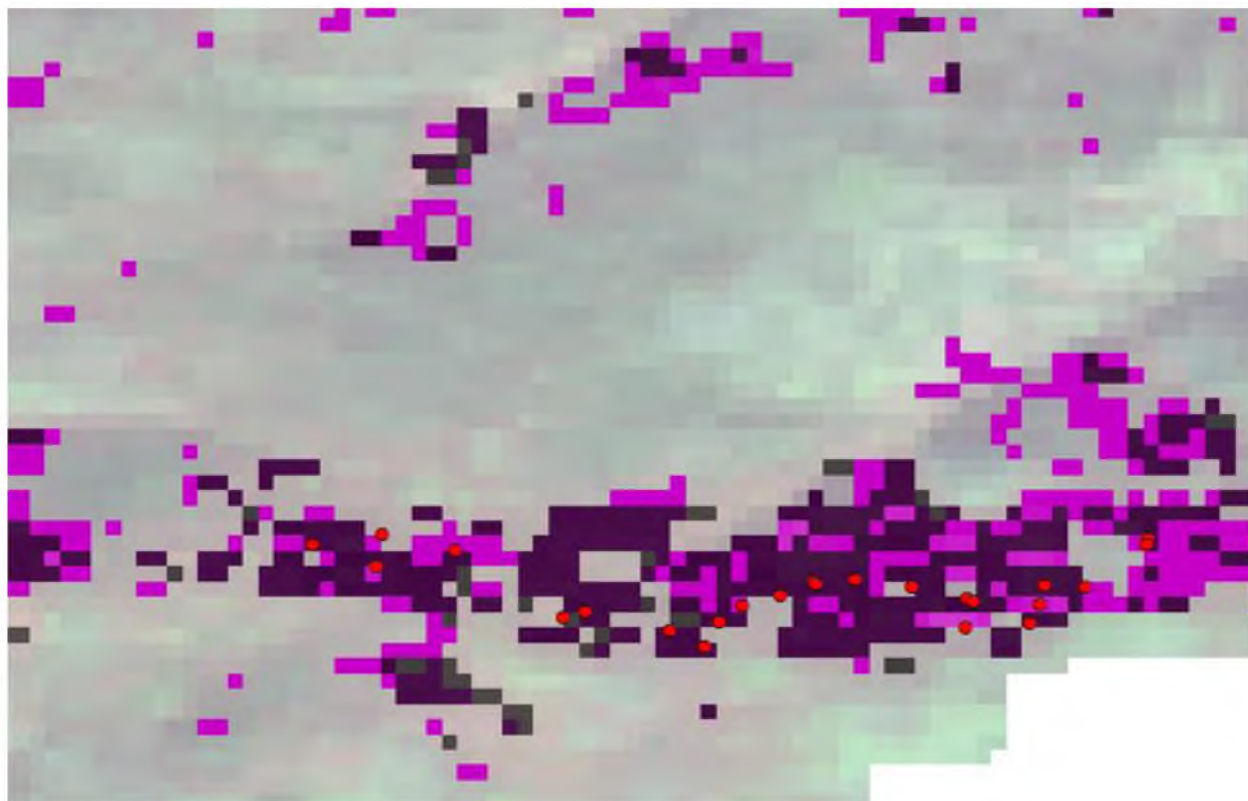


Рисунок 18 – Усыхания, полученные с помощью метода NDVI, SWVI и усыхания, полученные в программе SASPlanet

Светло-фиолетовый цвет отображает усыхания, полученные с помощью NDVI, темно-фиолетовый цвет отображает усыхания, которые были отображены с помощью индексов NDVI и SWVI одновременно, серый цвет отображает усыхания полученные с помощью SWVI.

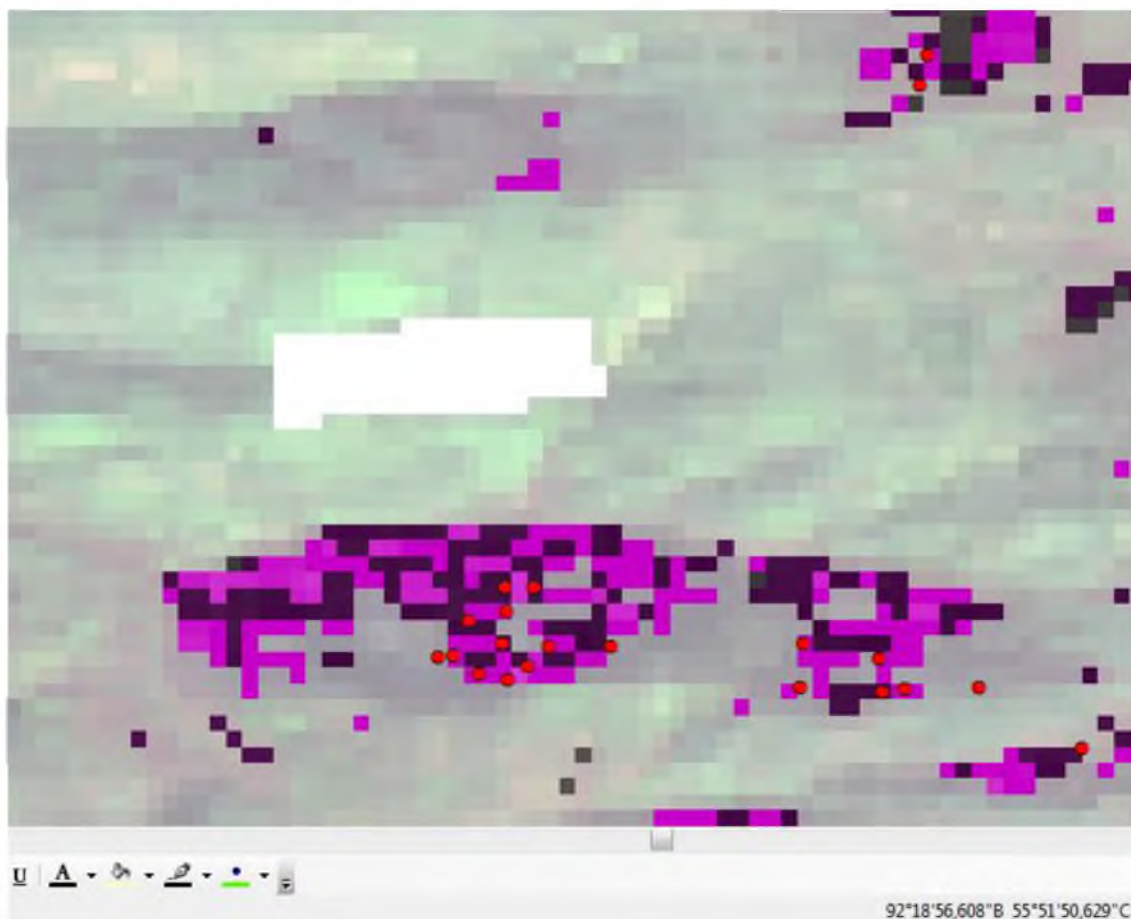


Рисунок 19 – Усыхания, полученные с помощью метода NDVI, SWVI и усыхания, полученные в программе SASPlanet

Территории с усыханиями, которые были получены с помощью индекса SWVI, пересекаются с территориями усыханий, полученными с помощью индекса NDVI. Также видно, что большинство усыханий, которые были визуально видны по снимкам высокого разрешения в программе SASPlanet, попадают на пересечение полученных усыханий с помощью индексов NDVI и SWVI.

5 Определение усыхания территории и оценка ландшафтной приуроченности усохших лесов

5.1 Определение степени усыхания темнохвойных лесов.

Для того, чтобы рассчитать степень усыхания исследуемой территории, необходимо рассчитать площадь усохших и здоровых лесов. Для этого была проведена контролируемая классификация методом минимального расстояния. Эталонные участки усыханий определялись с помощью информации, полученной ранее из различных методов по выявлению усохших лесов. Было создано 16 выборок для информационных классов: лес и усыхание (рисунок 20). Количество классов было определено экспертным путем.

Class #	>	Signature Name	Color	Red	Green	Blue	Value	Order	Count
1	▶	Усыхание 1		1.000	0.000	0.000	1	1	15
2		Усыхание 2		1.000	0.000	0.000	2	2	12
3		Усыхание 3		1.000	0.000	0.000	3	3	14
4		Усыхания 4		1.000	0.000	0.000	4	4	24
5		Усыхания 5		1.000	0.000	0.000	6	6	30
6		Лес 1		0.000	0.392	0.000	9	9	266
7		Лес 2		0.000	0.392	0.000	10	10	2738
8		Лес 3		0.000	0.392	0.000	11	11	3374
9		Лес 4		0.000	0.392	0.000	12	12	16389
10		Лес 5		0.000	0.392	0.000	13	13	17845
11		Лес с облачностью		0.000	0.392	0.000	14	14	773
12		Лес 6		0.000	0.392	0.000	15	15	2806
13		Лес 7		0.000	0.392	0.000	16	16	46116
14		Лес 8		0.000	0.392	0.000	17	17	23
15		Лес 9		0.000	0.392	0.000	18	18	13
16		Лес 10		0.000	0.392	0.000	23	23	96
17		Не определно		0.000	0.000	0.000	19	25	9

Рисунок 20 – Таблица сигнатур

В редакторе сигнатур была выполнена предварительная оценка качества контролируемой классификации по сформированным сигнатурам классов. Для таких целей используются функциональные характеристики взаимного

положения классов, связанные с ожидаемой ошибкой классификации. Чем больше значение используемого критерия разделимости, тем меньше должны быть ошибки при разделении оцениваемых классов. Для определения разницы одной сигнатуры от другой использовали функцию Evaluate→Separability в программном комплексе ERDAS Imagine (рисунок 21).

Signature Name	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Усыхание 1 1	0	1385.75	1351.09	1414.21	1353.7	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21
Усыхание 2 2	1385.75	0	1326.78	1414.21	1410.16	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21
Усыхание 3 3	1351.09	1326.78	0	1414.21	1408.47	1414.21	1414.18	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21
Усыхание 4 4	1414.21	1414.21	1414.21	0	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21
Усыхание 5 5	1353.7	1410.16	1408.47	1414.21	0	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21
Лес 1 6	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	0	1411.9	1414.21	1398.16	1414.21	1412.91	1414.21	1403.69	1414.21	1414.21	1365.21	1414.21
Лес 2 7	1414.21	1414.21	1414.18	1414.21	1414.21	1411.9	0	1408.88	1302.58	1414.19	1413.35	1414.21	1368.51	1414.21	1414.21	1410.81	1414.12
Лес 3 8	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1408.88	0	1413.33	1410.23	1409.85	1400.83	1414.14	1414.21	1414.21	1414.21	1413.8
Лес 4 9	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1398.16	1302.58	1413.33	0	1413.43	1412.94	1414.09	1071.19	1414.21	1414.21	1381.05	1414.21
Лес 5 10	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.19	1410.23	1413.43	0	1408.94	1400.25	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21
Лес с облачностью 11	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1412.91	1413.35	1409.85	1412.94	1408.94	0	1412.73	1413.88	1414.21	1414.21	1412.96	1414.21
Лес 6 12	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1400.83	1414.09	1400.25	1412.73	0	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21
Лес 7 13	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1403.69	1368.51	1414.14	1071.19	1414.21	1413.88	1414.21	0	1414.21	1414.21	1385.17	1414.21
Лес 8 14	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	0	1414.1	1411.13	1414.21
Лес 9 15	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.1	0	1392.64	1414.21
Лес 10 16	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1365.21	1410.81	1414.21	1381.05	1414.21	1412.96	1414.21	1385.17	1411.13	1392.64	0	1414.21
Не определено 17	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.12	1413.8	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	1414.21	0

Рисунок 21 – Матрица разделимости сигнатур, мера разделимости пар классов, расстояние Джеффриса – Матусита

Значение матрицы 1414,21 говорит о том, что значения сигнатур полностью разделимы. Чем меньше значение, тем менее разделимы сигнатуры. В полученной матрице все классы достаточно разделимы.

Для определения площади усыхающих и здоровых древостоев нас интересуют 2 класса, а именно темнохвойный лес и усыхания, поэтому полученную классификацию перекодируем в три класса: усыхания, темнохвойные леса и третий класс, куда попадут все не интересующие участки снимка. После выполнения инструмента Recode, получили перекодированную классификацию, в которой три класса (рисунок 22).

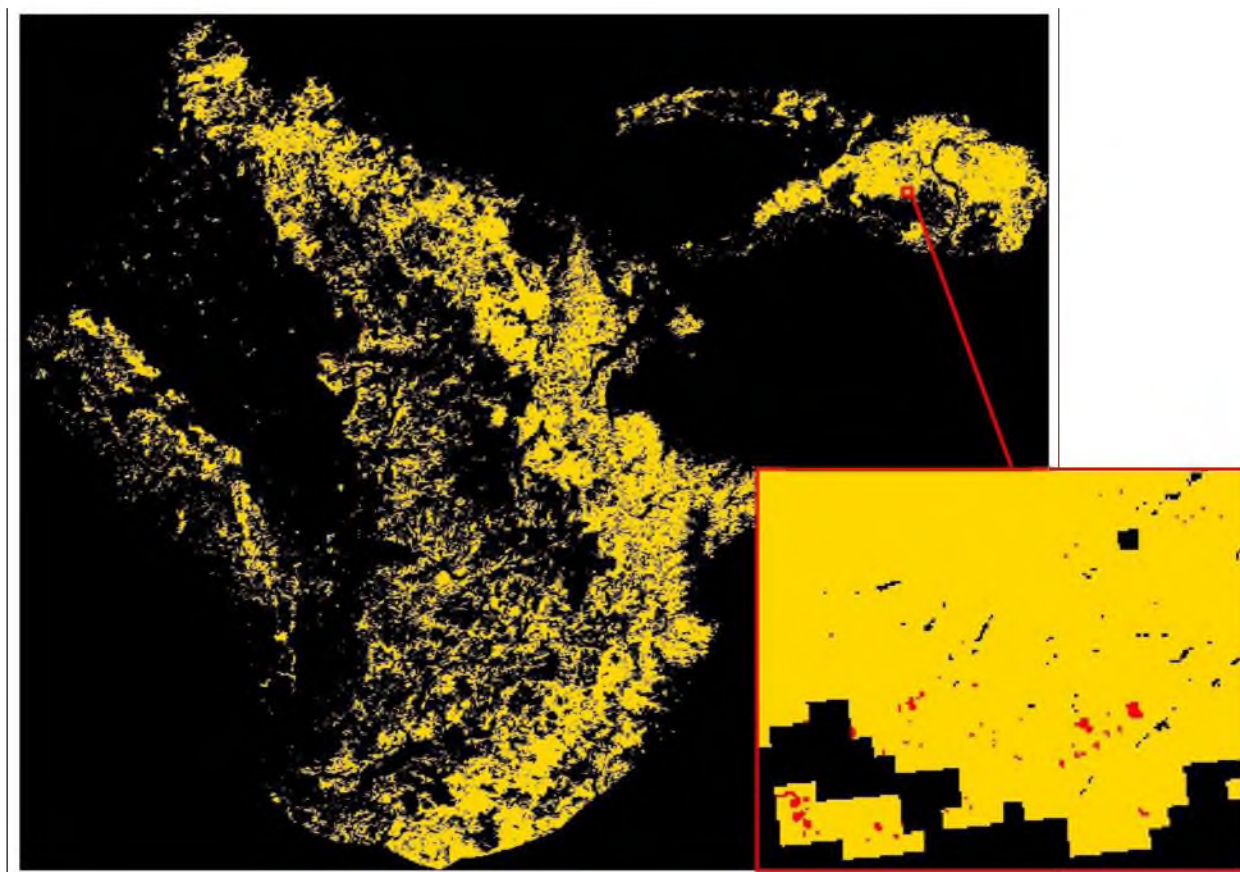


Рисунок 22 – Перекодированная классификация

Красным цветом отмечены усыхания, желтым - здоровые темнохвойные леса. После классификации, для того, чтобы определить степень усыхания территории, была посчитана площадь усыхания. Зная количество пикселей, которые отображаются как усохшие деревья и что у снимков Landsat разрешение 30м, можно посчитать площадь. Открыв таблицу атрибутов, полученного изображения, можно посмотреть количество пикселей усыхающих и здоровых лесов (рисунок 23).

recode_img						
Row	Histogram	Color	Red	Green	Blue	
0	277927043		0	0	0	
1	708720		1	0	0	
2	38366659		1	0.843137	0	

Рисунок 23 – Таблица атрибутов с количеством пикселей усыхающих и здоровых древостоев

Зная количество пикселей, которые отображаются как усохшие деревья и что у снимков Landsat разрешение 30 м, можно посчитать площадь. Открыв таблицу атрибутов слоя с усыханиями, можно посмотреть количество пикселей усыхающих лесов.

$$S_{\text{усохших}} = 708720 * 30 = 21261600\text{м}^2 \approx 21,3\text{км}^2 \text{ усохших лесов}$$

$$S_{\text{здоровых}} = 38366659 * 30 = 1150999770\text{м}^2 \approx 1151\text{км}^2 \text{ здоровых лесов}$$

Рассчитаем количество процентов усохших лесов на данную территорию

$$21,3 * 100 / (1151 + 21,3) = 1,8\%$$

5.2 Анализ характеристик рельефа на территориях с усохшими лесами

Для того, чтобы выяснить связь усыхания с поверхностью рельефа, были скачаны данные SRTM (Shuttle radar topographic mission, международная миссия по получению данных цифровой модели рельефа территории Земли) с разрешением 1 секунда дуги на территорию Кузнецкого Алатау и смежных хребтов – Абаканского и Салаирского кряжа. После скачивания данных SRTM была собрана мозаика, которая была ограничена исследуемой территорией. Далее на слой с мозаикой был наложен слой точек с местами усыханий (рисунки 24-26).

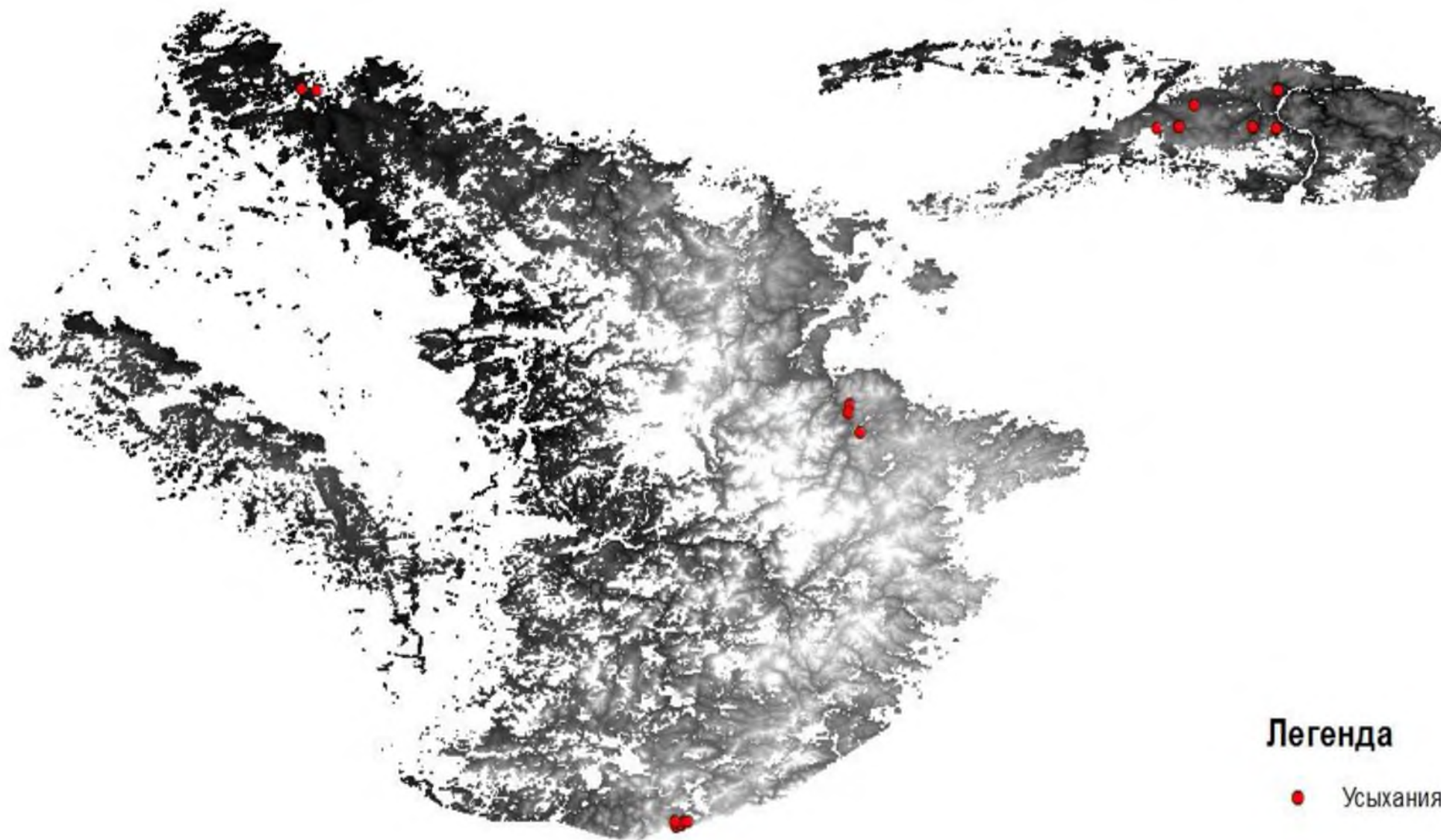


Рисунок 24 – Цифровая модель рельефа с разрешением 1 секунда

Рассмотри рисунок более детально.

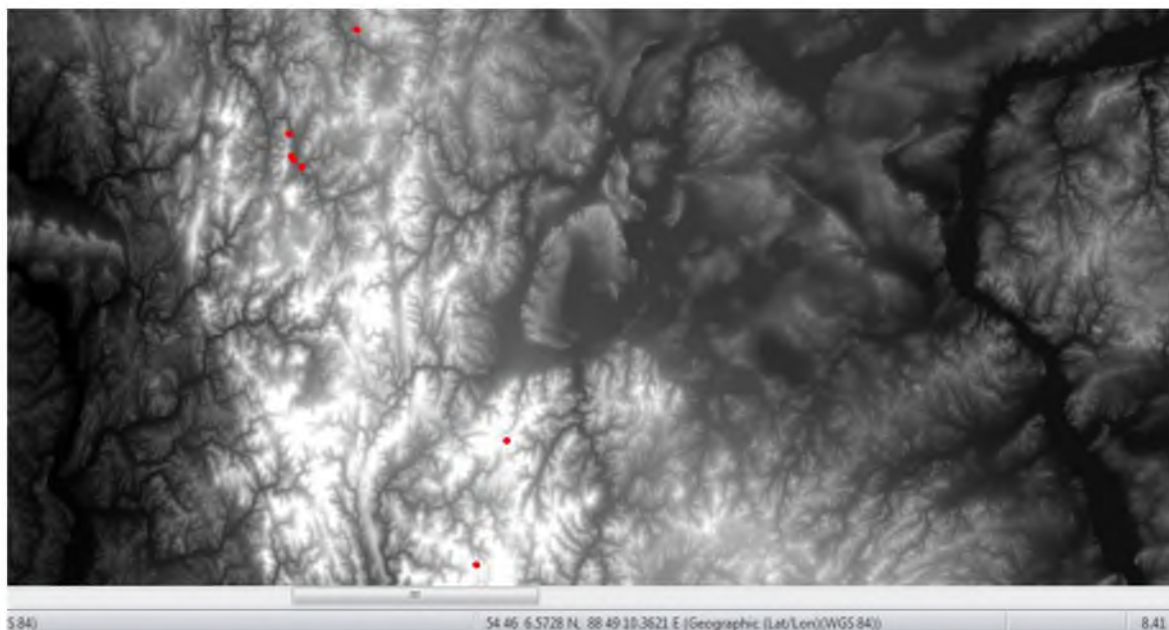


Рисунок 25 – Данные SRTM с точками усыхания

Проанализировав рисунок 25, можно сделать вывод, что места усыхания в основном расположены либо вблизи реки, либо на водоразделах.

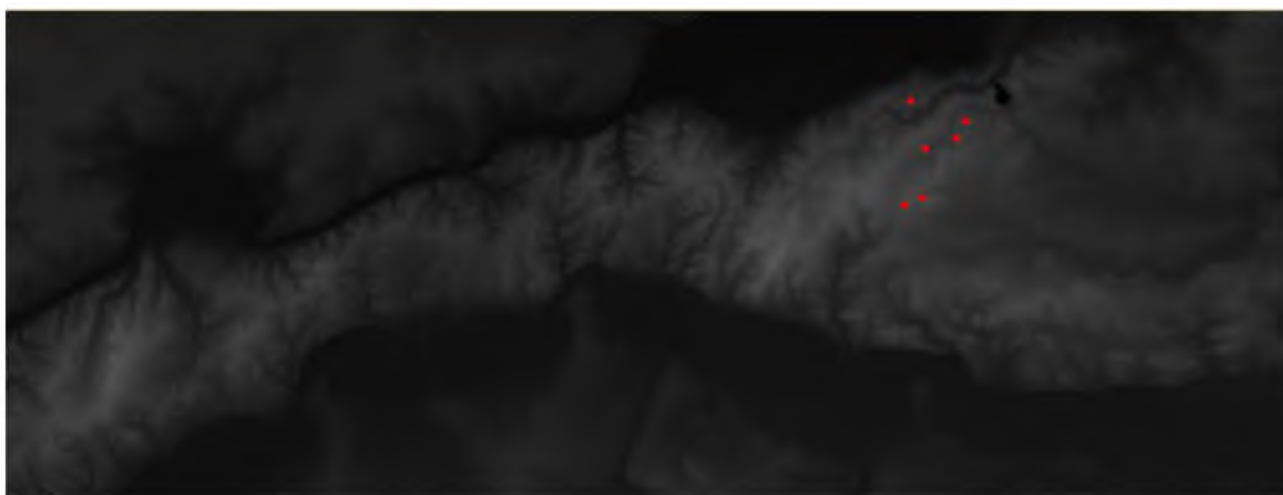


Рисунок 26 – Данные SRTM с точками усыхания

Проанализировав рисунок 26, трудно сказать, что участки усыхания связаны с определёнными характеристиками рельефа.

Для того, чтобы проанализировать связь усыханий темнохвойных лесов с рельефом, воспользуемся инструментом «Зональная статистика в таблицу». Перед тем как применять данный инструмент, необходимо перепроецировать данные SRTM в проекцию UTM зона 48N в системе географических координат WGS 1984. Для того, чтобы проанализировать, на какой высоте расположены усыхающие и здоровые леса в большинстве случаев, в качестве входных растровых данных будет полученная классификация. Входным растровым значением является данные SRTM на исследуемую территорию. Так как мы хотим получить среднее значение высоты, на котором расположен определенный класс поверхности земли, тип статистики выбираем «Mean» (таблица 5).

После применения данного инструмента, получаем таблицу, в которой отображается среднее значение высоты (в поле «Mean») на определенный класс поверхности земли.

Таблица 5 - Среднее значение высоты классов

Класс	Среднее значение высоты н.у.м., м
Усохшие древостой	631
Здоровые леса	598

Мы видим, что среднее значение высоты усыхающих древостоев на 33 м больше, чем у здоровых.

Так же необходимо посчитать отклонение высоты. Для этого также применяем инструмент «Зональная статистика в таблицу», но тип статистики выбираем «STD» (таблица 6).

Таблица 6 – Стандартное отклонение высоты каждого класса

Класс	Стандартное отклонение
Усохшие древостой	190
Здоровые леса	266

Проанализировав полученную таблицу, можно сделать вывод, что высота над уровнем моря у усохших темнохвойных лесов больше, чем у здоровых, но так как отклонение от высоты достаточно большое, трудно сделать вывод, что усыхания связаны с высотой рельефа.

С помощью инструмента «Зональная статистика» был рассчитан средний уклон и средняя экспозиция на определенный класс поверхности земли, а также их отклонения. В качестве входного растра значений были соответственно данные Уклона (рисунок 27) и Экспозиции (рисунок 28). Для получения данных уклона был применен инструмент «Уклон», где в качестве входного растра были данные SRTM. Для получения данных Экспозиции был применен инструмент «Экспозиция», где в качестве входного растра были данные SRTM.

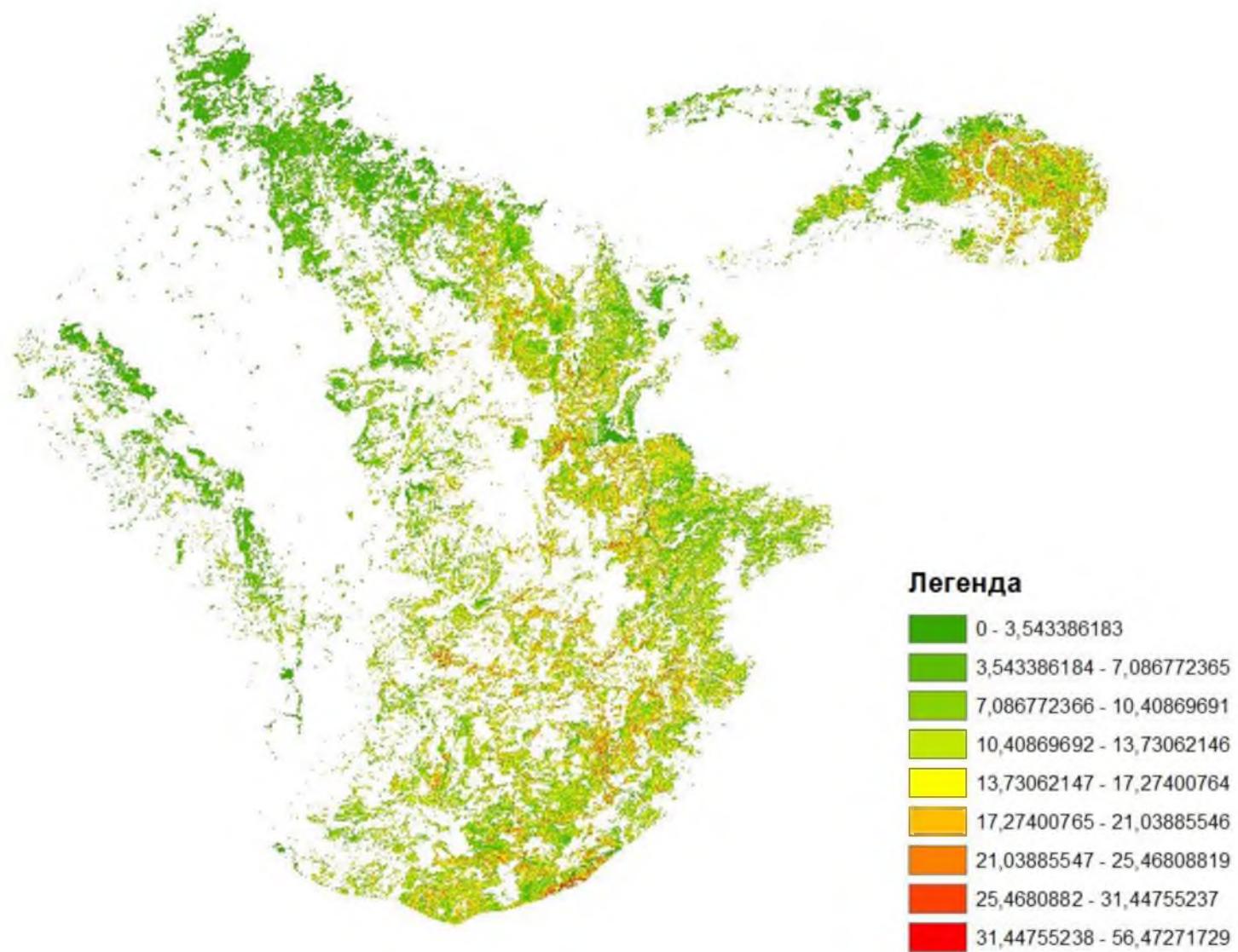


Рисунок 27 – Уклон Кузнецкого Алатау и смежных хребтов – Абаканского и Салаирского кряжа

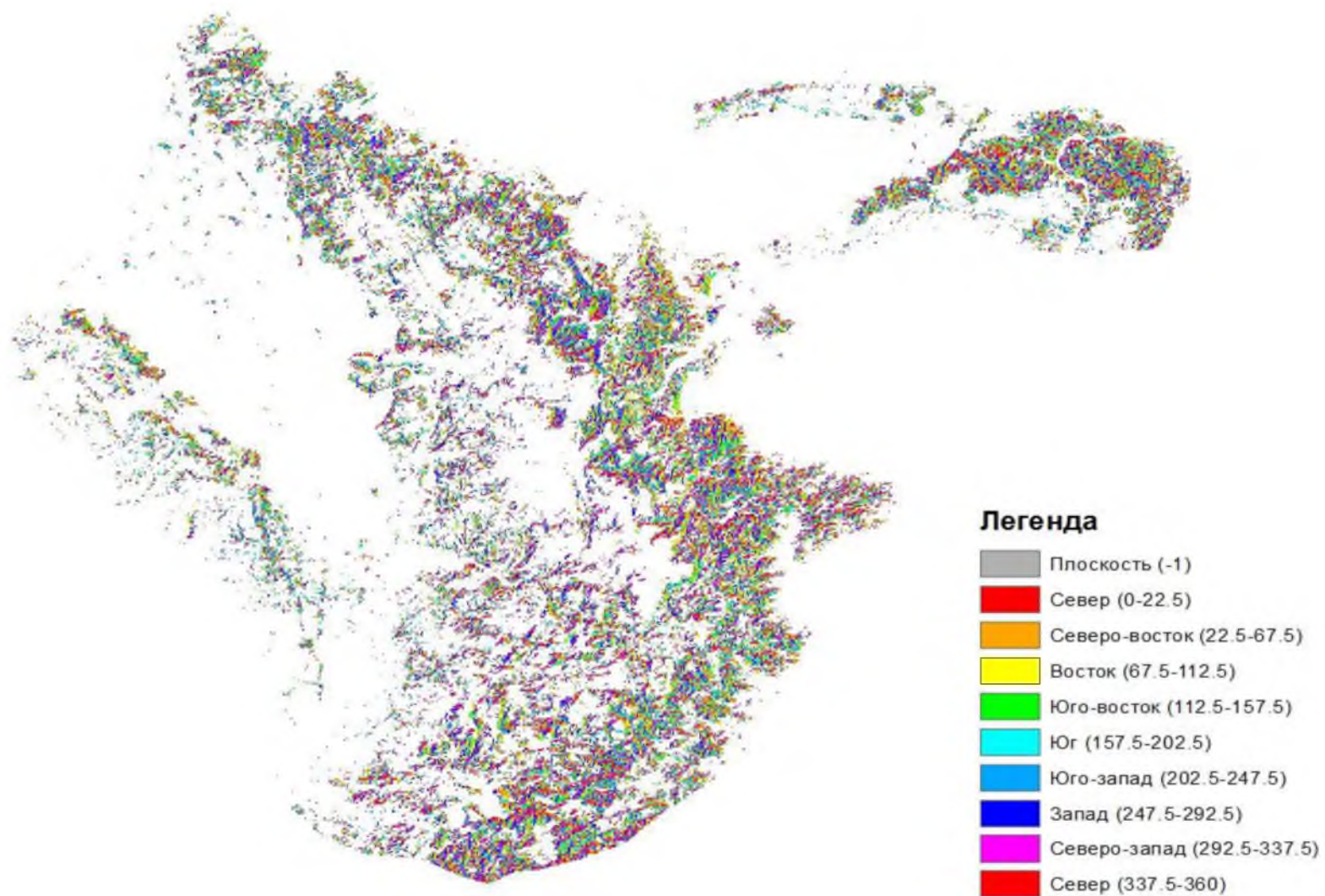


Рисунок 28 – Экспозиция Кузнецкого Алатау и смежных хребтов – Абаканского и Салаирского кряжа

Таблица 7 – Значения уклон, экспозиции и их отклонений,

Наименование класса	Уклон, градус	Отклонение уклона, градус	Экспозиция	Отклонение экспозиции
Усохшие древостои	9,232276	7,186787	166,991	97,45752
Здоровые древостои	9,363174	6,723217	183,0091	108,5153

Показатель крутизны склонов в классах с усыхающими и здоровыми лесами не сильно отличается. Отклонение от среднего уклона в каждом классе достаточно большое, поэтому достаточно сложно проанализировать связь уклона поверхности с усыханиями лесов.

Практически все усыхающие леса расположены на склонах, имеющих направление на юг, однако и территории со здоровыми лесами имеют такое направление, что требует более детального изучения.

5.3 Создание векторной карты с усыханиями и здоровыми лесами

После получения территорий с усохшими древостоями, растровый слой с усыханиями с помощью инструмента «Растр в полигон» в программном комплексе Argis был сконвертирован в полигоны. Для лучшего визуального отображения усыханий с помощью инструмента «Объект в полигон» был создан класс пространственных объектов, содержащий точки, созданные из представительных местоположений входных полигонов. Далее полученный слой с усыханиями был наложен на цифровую топографическую основу, созданную в ВСЕГЕИ[12] (приложение А).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были рассмотрены методы выделения усохших лесов: с помощью индекса NDVI, индекса SWVI, метода главных компонент, индекса NBR. Для верификации результатов были выделены усохшие древостои с помощью данных программы SASPlanet с высоким пространственным разрешением.

Также рассчитана площадь усохших и здоровых древостоев на территории Кузнецкого Алатау и смежных хребтов – Абаканского и Салаирского кряжа. Определено что 1,8% территории занимают усохшие леса с точностью определения 73,33%. Также был проведен анализ ландшафтной приуроченности усыхающих лесов, в результате которого можно сказать, что высота над уровнем моря у усохших темнохвойных лесов больше, чем у здоровых. Уклон склонов в классах с усыхающими и здоровыми лесами не сильно отличается. Наибольший вклад в экспозиционное распределение для исследуемой территории вносят склоны южной ориентации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Барталев, С.А. Исследование земли из космоса / С.А. Барталев, Д.В. Ершов, А.С. Исаев. — Москва: Международный институт леса РАЕН, 1999. — С. 76-86.
2. Барталев, С.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрогра MODIS / С.А. Барталев, В.А. Егоров, Д.В. Ершов, А.С. Исаев, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, И.А. Уваров. — М: Институт космических исследований РАН, 2011. — Т. 8, № 4. — С. 285 – 302.
3. Горбачева, Е.Н. Программный комплекс ENVI профессиональное решение для комплексной обработки мультиспектральных, гиперспектральных и радарных данных / Е. Н. Горбачева// Геоматика, №2, 2013 — С. 50-54.
4. Дистанционное зондирование [Электронный ресурс] : Определение задач обработки снимка и выбор способа классификации. – Режим доступа: http://www.nrcgit.ru/aster/methods/metods/spectrum_angle.htm.
5. Капралов, Е. Г. Геоинформатика / Е. Г. Капралов, А. В. Кошкарев, В. С. Тикунов и др. — М: Издательский центр «Академия», 2005. — 480 с.
6. Королев, В. А. Оценка степени восстановления леса после пожара с использованием возможностей дешифрирования космических снимков/ В.А. Королев, Ю.Ф Рожков, О.Ю Рожкова// Юный ученый. — 2016. — №4.1. — С. 77-79.
7. Крылов, А.М. Дистанционный мониторинг состояния лесов по данным космической съемки/ А.М. Крылов, Н.А. Владимирова //Геоматик, №3, 2011. — С.53-57
8. Манылов, И. В. Оценка точности распознавания классов при автоматизированной обработке аэрофотоснимков / И. В. Манылов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение: научно-технический журнал / Университет ИТМО. – Санкт-Петербург, 2011. — Т. 54, № 5. — С. 35-39.
9. Наука в Сибири [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://www.nsc.ru/win/elbib/hbc/article.phtml>

10. Олссон, Р. Бореальные леса и изменение климата/ Р. Олсон // Устойчивое лесопользование/ Всемирный фонд природы. – Москва, 2011, № 3. – С. 27-38
11. Руководство по эксплуатации модуля FLAASH [Электронный ресурс] — Режим доступа: http://www.nrcgit.ru/metod/nrcgit_flaash.pdf
12. Сайт Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского [Электронный ресурс]:- Режим доступа: <http://www.vsegei.com/ru/>(10.05.2017г).
13. Сайт Геологической службы США [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://earthexplorer.usgs.gov/>
14. Сайт Геологической службы США [Электронный ресурс]: USGS. Landsat Missions. Landsat8. - Режим доступа:<http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>
15. Сайт ГИС ассоциация [Электронный ресурс]: GIS market support association.– Режим доступа: <http://www.gisa.ru/1489.htm>
16. Сайт ГИС ArcGIS [Электронный ресурс]: - Режим доступа <http://www.arcgis.com/home/index.html> (1.06.2017)
17. Сайт Доверительные интервалы выборок [Электронный ресурс]: — Режим доступа: <http://statistica.ru>
18. Сайт Матрица ошибок и расчет показателей точности тематических карт [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/error-matrix.html>
19. Сайт Природа Кузбасса [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://visit-kuzbass.ru/ru/about-kuzbass/priroda.html>
20. Сайт Пример расчета t-критерия Стьюдента для независимых выборок [Электронный ресурс]: — Режим доступа: <http://statpsy.ru>
21. Сайт Программные продукты семейства ArcGIS [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://www.credospb.com/arcgis.htm>
22. Сайт NDVI – теория и практика [Электронный ресурс]: — Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>

23. Сайт SAS.Планета [Электронный ресурс]: - Режим доступа <http://sasgis.ru/sasplaneta/>
24. Сайт Global Forest Change 2000–2015 [Электронный ресурс]: - Режим доступа: http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest/download_v1.3.html
25. Сторожев, В.П. Оценка жизненного состояния кедровых и пихтовых лесов ООПТ Алтае-Саянского региона / В. П. Сторожев и [др.] // Мониторинг биоразнообразия на особо охраняемых природных территориях Алтае-Саянского региона: науч. тр. Ассоциации заповедников и нац. парков Алтае-Саянского экорегиона/СО РАН – Новосибирск, 2008. – Вып 1. – С. 62–68.
26. Токарева, О.С/ Обработка и интерпритация данных дистанционного зондирования Земли: учебное пособие / О.С. Токарева; Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. —148 с.
27. Тузова В.К. Методы мониторинга вредителей и болезней леса / В.К. Тузова — Москва: ВНИИЛМ, 2004. — 56 с.
28. Уварова, Н.Н. Климат как глобальная проблема: прошлое, настоящее, будущее/ Н.Н. Уварова // Успехи современного естествознания. — Москва, 2006. — № 4. — С. 100-102.
29. Чандра, А. М. Дистанционное зондирование географические информационные системы / А. М. Чандра, С. К. Гош – Москва: Техносфера, 2008. – 288 с.
30. Ceccato, P Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain/ P. Ceccato, S. Flasse , S. Tarantola, S. Jacquemond, J. Gregoire// Remote Sensing of Environment, 77, 2001, p. 22–33.
31. Franklin, S.E. Aerial and satellite sensor detection and classification of western spruce budworm defoliation in a subalpine forest. Canadian Journal of Remote Sensing / S.E. Franklin, R.H. Waring, R.W. McCreight, W.B. Cohen, M.: Fiorella 1995. — С. 299–308.

32. Hansen, M. C. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change/ M.C Hansen, P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, and J. R. G. Townshend // *Science* 342, 2013— C. 850–853.

Карта усыхания на территории Кузнецкого Алатау и смежных хребтов – Абаканского и Салаирского кряжа масштаба 1:2 000 000

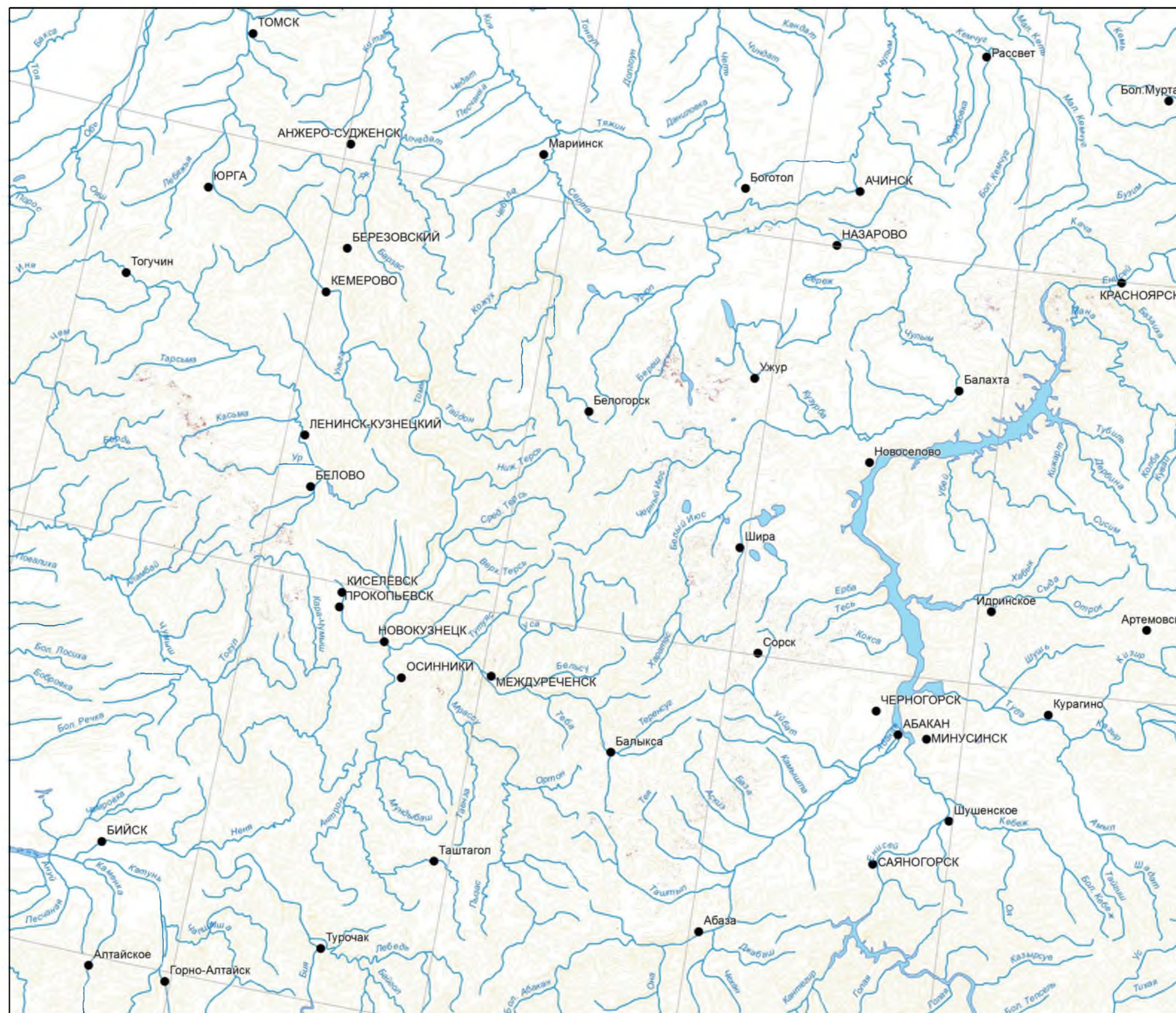


Рисунок А - Карта усыхания на территорию Кузнецкого Алатау и смежных хребтов – Абаканского и Салаирского кряжа масштаба 1:2 000 00